



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2016년 2월
석사학위 논문

하절기 복수기 진공도
최적운영을 통한 한빛 1발전소
이용률 향상에 관한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 수 남

하절기 복수기 진공도
최적운영을 통한 한빛 1발전소
이용률 향상에 관한 연구

A study on the utilization improved over the summer
condenser vacuum optimum operating for Hanbit NPP 1

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 수 남

하절기 복수기 진공도
최적운영을 통한 한빛 1발전소
이용률 향상에 관한 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 수 남

김수남의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 정 운 관 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	iii
그림 목차	iv
ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 1 절 하절기 복수기 진공도 최적운영을 통한 한빛 1발전소 이용률 향상 배경 ...	1
제 2 장 발전소 계통설명 및 설계기준	1
제 1 절 순환수 계통	1
제 2 절 복수계통	4
제 3 장 한빛 1발전소 복수기 현황 및 문제점 분석	6
제 1 절 복수기 일반사항	6
1. 복수기 설계사항	6
2. 저압터빈 배압과 복수기 압력	6
3. 복수기 성능 영향인자	7
제 2 절 운전현황	10
1. 검토 조건	10
2. 운전현황 비교	10
3. 복수기 튜브 플러깅	12
4. 복수계통 용존산소 추이곡선	13
5. 복수기 공기 추출기 용량 제한	14
제 3 절 복수기 성능저하 원인분석	14
1. 복수기 성능 진단 차트	14
2. 복수기 성능 진단 변수 비교	15
3. 한빛1호기 분석	15
4. 한빛2호기 분석	16
5. 복수계통 용존산소 농도 및 복수기내 Air Binding 존재	17

6. 복수기 튜브 플러징	19
7. 저압터빈 특성에 따른 복수기 압력 증가시 출력결손이 큼	19
제 4 장 개선방안	20
제 1 절 복수기 전열관 세정계통 운전방법 개선을 통한 냉각수 유량 확보	20
1. 복수기 전열관 세정계통 운전 후 상,하부 스크린 개방상태 유지	20
2. 복수기 입구 Debris Filter 운전방법 개선	21
3. 복수기 전열관 정상화를 통한 냉각수 유량 및 전열면적 확보	22
제 2 절 복수기 전열관 오염 저감 개선	22
1. 복수기 전열관 세정계통 운전 기준 재설정	22
2. 순환수 펌프 6대 운전시 복수기 전열관 세정계통 운전 주기 연장	22
3. 순환수 배관, 복수기 전열관 표면에 해양생물 부착 및 성장억제	23
4. 취수구 및 방출구 뱀 제거	23
5. 복수기 전열관 세정 필요	24
6. 복수기 전열관 세정 설비 교체	24
제 5 장 결론	26
참고문헌	40

표 목 차

표 2.1.1 순환수 계통 동작조건 및 정상범위	2
표 3.1.1 복수기 영향인자와 압력 관계	9
표 3.2.1 한빛1,2호기 발전소 운전초기 해수 최대온도에서 출력비교	10
표 3.2.2 2010년 해수 최대온도에서 출력비교	11
표 3.2.3 2011년 해수 최대온도에서 출력비교	12
표 3.3.1 복수기 성능 진단 변수 비교	15
표 3.3.2 저압터빈 특성에 따른 복수기 압력 증가시 출력결손	19

그 립 목 차

그림 3.1.1 복수기 압력 변수에 따른 운전변수 추이곡선	8
그림 3.2.1 복수계통 용존산소 추이곡선(한빛1호기)	13
그림 3.2.2 복수계통 용존산소 추이곡선(한빛2호기)	13
그림 3.3.1 복수기 성능 진단 차트	14
그림 3.3.2 복수기 진공펌프 운전시 복수기 압력변화(1/2)	17
그림 3.3.3 복수기 진공펌프 운전시 복수기 압력변화(2/2)	18
그림 3.3.4 부하 감발시 복수기 압력 및 Air Bound 상태	18
그림 4.1.1 복수기 전열관 세정계통 운전 후 상,하부 스크린 개방시 출력변화	20
그림 4.1.2 복수기 입구 Debris Filter 운전방법 개선 후 출력변화	21
그림 4.2.1 복수기 전열관 세정 설비 교체 전 구조도(한빛 1발전소)	24
그림 4.2.2 복수기 전열관 세정 설비 교체 후 구조도(APR 1400 발전소)	25

ABSTRACT

A study on the utilization improved over the summer condenser vacuum optimum operating for Hanbit NPP 1

By Kim, Soo Nam

Adviser : Prof. Song, Jong Sun, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Power plant condenser, it is necessary to review the operational parameters, such as to restore the performance of contamination increases, so that directly affect the performance as the operation in an increasing directly affect the performance as the operation in an increasing number. Since the condenser pressure increment by plants that affect the plant efficiency when sea temperatures rise during the summer period is very large, depending on the generator output is significantly reduced by reviewing the condenser pressures influencing factors such as the summer period, as well as to establish a year-round operation condenser vacuum improvement to contribute to increased utilization and power sales was to begin the study.

제 1 장 서 론

국내 원자력 발전소 복수기는 운전년수가 증가함에 따라 성능에 직접적으로 영향을 주는 오염도가 증가되므로 성능을 복구하기 위하여 운전변수 등의 검토가 필요함. 하절기 기간 중 해수온도 상승시 발전소 효율에 영향을 주는 복수기 압력 증가폭이 매우 큼에 따라 발전기 출력이 크게 감소하므로 복수기 압력 영향인자 등을 검토하여 하절기 기간뿐 아니라 연중 복수기 진공도 개선방안을 수립하여 운영함으로써 발전소 이용률 및 전력판매량 증대에 기여하고자 본 연구를 시작하게 되었다.

제 1 절 하절기 복수기 진공도 최적운동을 통한 한빛 1발전소 이용률 향상 배경

국내 원자력 발전소의 복수기는 운전년수가 증가함에 따라 성능에 직접적으로 영향을 주는 오염도가 증가되므로 성능을 복구하기 위하여 운전변수 등의 검토가 필요하다. 따라서 한빛 1발전소의 하절기 기간 중 해수온도 상승시 발전소 효율에 영향을 주는 복수기 압력 증가폭이 매우 큼에 따라 발전기 출력이 크게 감소하므로 복수기 압력 영향인자 등을 검토하여 하절기 기간뿐 아니라 연중 복수기 진공도 개선방안을 수립하여 운영함으로써 발전소 이용률 및 전력판매량 증대에 기여하고자 한다.

제 2 장 발전소 계통설명 및 설계기준

제 1 절 순환수 계통

1. 기능

순환수 계통은 열 제거원으로 영광 근해의 해수를 이용한 개방형, 한 방향, 냉각수 계통이다. 이 계통은 발전소 모든 운전 기간 동안 주복수기에서 순환수까지 폐열을 제거하기 위해 설계되었다.

2. 설계 기준

가. 안전 설계 기준

- (1) 순환수 계통은 비안전 관련이다. 계통의 Failure는 안전관련 계통에 영향을 미치지

않으며 발전소 안전정지에 관련이 없다.

- (2) 순환수 배관의 팽창연결부(Expansion Joint)의 고장으로 터빈건물의 침수를 방지하기 위해 Non-Class 1E 전원을 받고 복수기에 설치되어 있는 고-고 침수 수위 감지기가 제공된다. 2/3 수위스위치 신호는 자동적으로 순환수 펌프를 정지 시킬 것이다.

나. 출력 운전 설계 기준

- (1) 순환수 계통은 열균형(Heat Balance)에 따라 세 개의 복수기 셀이 1%의 증기 발생기(Steam Generator) 취출수와 0.5% 복수 충수의 최대 부하에서 폐열을 제거하도록 설계되었다.
- (2) 순환수 계통은 설계 배압을 유지하기 위해 복수기에 바닷물을 적정하게 공급하도록 설계되었다.
- (3) 순환수 계통의 정격 용량은 20.5 °C의 바닷물 온도와 1.5 inHg의 복수기 절대 압력을 위해 858,000 gpm의 해수 유량이 -9.5 °C의 온도 상승에 기초한다.
- (4) 순환수 계통의 동작 조건의 정상범위는 아래와 같다.

표 2.1.1 순환수 계통 동작조건 및 정상범위

온도 운전변수		월간 평균		년간 평균	최대 값	설계 값
		저	고			
순환수 온도	°F	39.6	81.9	63	96.8	89.6
	°C	4.2	27.7	17.2	36	20.5
복수기 압력	inHgA	0.78	2.12	1.27	3.29	1.5
	mmHgA	19.8	53.8	32.3	83.6	38.1

- (5) 발전소의 해수 수위는 7.8 ft(소조, Neap Tide)에서 17.1 ft (대조, Spring Tide) 까지 변화한다. 계통설계에 사용되는 해수 수위 최대 변화 범위는 25.4 ft이다. 100 ft의 해저 자료수위를 바탕으로는 최대 해수높이는 79.7 ft이고 최저 해수 높이는 54.3 ft이다.
- (6) 회전망 상부에 차아염소산염 용해제를 주입하는 것은 순환수계통의 해양 생물의 성장을 최소화할 수 있게 한다. 차아염소산은 순환수 계통이 근해의 환경 제한치를 넘지 않도록 방지하기 위하여 감시 된다.
- (7) 오물제거장치(Trash Rack)와 회전망은 Intake 구조물 안에서 물고기와 이물질(Debris)이 생기는 것을 최소화 하기위해서 제공된다. 게다가 계통은 직경

- 3/8in 구멍을 통해 통과될 수 있는 Self-Cleaning 이물질여과기(Debris Filter)가 설치되어 있다.
- (8) 순환수펌프 출구 버터플라이 밸브는 기동 및 정지시에 펌프 손상과 일시적인 수격 작용을 방지하기 위해 열림과 닫힘을 연속적으로 하도록 프로그램 되어 있다.
 - (9) 계통운전은 기동과 정지동안 과도한 수격현상 및 하나 이상의 순환수 펌프의 손실로 인한 압력 증가는 최소화 하고 계통의 기기들이 손상되지 않게 한다.
 - (10) Hydraulic Institute Standards와 취수구(Intake) 구조물모델 시험은 취수구 구조물의 설계 및 순환수 펌프의 위치를 정하기 위해 사용된다.
 - (11) 수실배기계통(Water Box Scavenging System)은 비응축성 가스를 제거하기 위해 제공된다.
 - (12) 적절한 배수를 포함하여 튜브 누출 사고시 순환수 측에 있는 각 콘덴서 셸의 1.5배(One Half)의 차단 능력을 제공하도록 설계되었다.
 - (13) 순환수 취수구 구조물은 필요에 따라 Gantry Crane을 이용하여 유지보수 하도록 설계되어 있다.
 - (14) 순환수계통은 복수기 피트(Pit)의 엄청난 누출 시 터빈건물의 침수를 방지하기 위하여 자동으로 차단되도록(Sequential Trip of Pumps) 설계 되었다.
 - (15) 순환수 펌프는 Nonessential Bus의 손실 시에도 4개의 순환수 펌프가 동작하도록 하기 위해 4개의 Nonessential Buses로부터 전원을 공급받는다.
 - (16) 계통은 출력 운전 동안 1개 펌프의 차단과 유지보수의 능력을 가지고 있다.
 - (17) 복수기는 튜브와 튜브 판 연결부를 통하여 해수의 내부 누설을 방지하기 위해 2개의 수두탱크(Static Head Tank)를 사용하여 응축수로 가압된 튜브판(Integral Groove Tube Sheet)이 제공된다.

다. 운전사항

- (1) 순환수계통은 16% 용량을 갖는 6대의 순환수 펌프와 관련 배관, 도관, 밸브, 제어와 계측장치로 구성되어 있다. 각각의 흡입 피트(Pit)에 위치한 순환수 펌프는 취수구 구조물로부터 흡입을 취하며 주복수기의 튜브 측을 통해 물을 순환시키고 출구배관으로 다시 방출한다.
- (2) 6개의 펌프 출구배관은 펌프의 유지보수를 수행하거나 또는 펌프의 트립 후에도 6개의 수실(Water Box)을 통하여 냉각수 유량을 유지하도록 서로 연결되어 있다.

헤더를 서로 연결한 후에 냉각수는 각 6개의 복수기 수실의 6 배관을 통하여 흐르게 된다. 수실에 유입되기 전에 해수는 3/8 인치의 구멍을 갖는 이물질여과기를 통해 흐른다. 정상 출력운전 동안, 순환수는 취수구 구조물에서 복수기튜브 안의 생물학적 성장과 취수구 구조물 안의 해양 유기체의 성장을 조절하기 위하여 염소로 처리되어 진다.

- (3) 애머탭(Amertap) 복수기 튜브 청정계통은 복수기 튜브 내에 침적된 이물질을 계속 제거하여 내부 표면의 청결상태를 유지한다. 또한 이물질 여과기(Debris Filter)가 수실 입구 관에 설치되어 있다.
- (4) 4개의 3in 배관들은 각 수실의 상부에 Amertap Rubber Ball을 주입하기 위해 사용된다. 복수기 튜브 통해 통과한 후, Amertap Ball은 수실 출구 배관에 위치한 스트레이너 부분에 모아진다. 여기에서부터 재주입(Re-injection Pump)펌프는 주냉각수에 불을 재 주입한다.
- (5) 복수기에는 응축수로 가압되는 튜브 판이 있어 튜브와 튜브판 연결부를 통해 해수가 유입되는 것을 방지한다. 가압은 수두탱크(Static Head Tank)를 사용하여 수행된다.

제 2 절 복수 계통

1. 기능

복수계통은 터빈 추기증기와 주급수 펌프 터빈 추기 증기를 응축시키고, 집수정에 복수를 수집하고, 집수정의 복수를 복수 정화 탈염기와 저압가열기를 거쳐 주급수 펌프 흡입까지 펌핑한다.

2. 설계 기준

가. 안전 설계 기준

복수계통은 비 안전 설계기준이다.

나. 출력 운전 설계 기준

- (1) 복수계통 설계는 1.0 % 증기 발생기 취출수와 0.5 % 계통 누설 보충을 가진 100 % 부하에 기초한다.
- (2) 복수계통은 부하 탈락 과도상태 및 안정 상태(예를 들면 100 %, 75 %, 50 %, 25 %)

- 25 % 정격부하) 동안 복수와 주급수 펌프에 충분한 유효흡입수두를 제공한다.
- (3) 각각의 저압 가열기는 정상운전 동안 모든 가동되는 3계열을 가지고 정격유량의 33⅓ %를 취급한다. 그러나 각각 가열기는 정격유량의 최대 50 % 취급하도록 설계되었다. 그래서 한 계열이 운전정지 되었을 때, 두 계열이 정격 유량의 100 %를 취급 할 수 있다.
 - (4) 외부부하 상실이 소내부하로 이어졌을 때, 가열기 배수펌프가 동작 하지 않는다고 가정하면 주급수 펌프 공동현상이나 발전소 정지를 방지하기위해 3대의 복수 펌프는 증기발생기 정격 급수 유량의 최소 96 % 공급할 것이다.
 - (5) 복수계통은 33⅓ % 용량의 4대 펌프 중 정격운전 중에는 3대가 운전된다.
 - (6) 복수기 공기제거계통과 함께 복수계통은 산소 제어를 위한 복수의 요구산소 제거치를 제공하도록 설계 되었다. 복수기 공기제거계통은 운전기술설명서 복수기 진공 추출기 계통에 기술되었다. 저 부하에서 집수정에 있는 복수는 보조증기 발전기와 보조 증기계통으로부터의 증기로 뿌려진다.
 - (7) 복수계통은 튜브 파열 때문에 터빈 안으로 물이 유도되는 것을 방지하기 위하여 모터구동 격리 밸브들의 닫힘에 의해서 3계열의 저압 가열기 중 어느 것이라도 격리되도록 설계되어졌다. 공기구동 저압 우회라인 밸브는 필요할 때 저압 가열기 계열을 우회할 것이다. 저압 또는 고압급수 가열기에 쉘 고-고 수위 때문에 물이 유입되는 것에 대한 보호를 위하여 급수 가열기 추기, 배수 및 배기계통(AF 계통)을 참고하라.
 - (8) 복수기로의 공기누설은 밀봉수 스템을 가진 2.5인치 이상과 메탈 다이아프램 밀봉을 가진 2.0인치 이하의 밸브를 제공하는 것에 의해 최소화된다.
 - (9) 복수계통은 안정상태 및 과도상태 운전 중에도 복수기 집수정 수위를 자동적으로 유지한다.
 - (10) 복수계통은 튜브 파열 후에 복수기 집수정 격리와 배수를 허용할 수 있도록 설계 되었다. 오염된 복수는 오버보딩(Over-boarding) 펌프로 배수되고 순환수 배출도관으로 보내진다.
 - (11) 주복수기는 터빈 우회 또는 배수로부터의 증기 충격에 의한 배플이나 튜브 파열을 방지하도록 설계되었다.

다. 운전사항

- (1) 복수계통은 3개의 표면식 복수기, 4개의 저압 급수가열기로 구성된 3계열, 배관,

- 밸브, 기기, 제어기로 구성된다.
- (2) 저압 터빈과 주급수 펌프 터빈으로부터의 추기 증기는 복수기로 흘러들어가 복수기 공기제거계통 복수기의 튜브 측을 통해 흐르는 순환수에 의하여 응축되어진다. 공기가 제거된 복수는 복수기 집수정에 모인다.
 - (3) 복수기는 또한 복수계통 뿐만 아니라 주증기계통, 주 터빈계통, 주급수계통, 주급수열추출, 배수 및 배기계통과 같은 다양한 계통의 배수, 덤프, 방출밸브 출구로부터 유입된다.
 - (4) 집수정으로부터 복수는 복수펌프 흡입수두로 흐른다. 복수펌프는 흡입 헤더로부터 흡입을 받고 복수 출구헤더로 방출한다.

제 3 장 한빛 1발전소 복수기 현황 및 문제점 분석

제 1 절 복수기 일반사항

1. 복수기 설계사항

- 가. 형식은 단일압력으로 3 shell로 되어있으며, 열제거 용량은 6.1163×10^9 btu/hr 이다.
- 나. 배기증기유량은 6,078,210 lb/hr이고, 열전달 표면적은 1,029,250 ft^2 이다.
- 다. 튜브재질은 티타늄으로 되어있으며, 직경은 1 inch이다.
- 라. 튜브내 냉각수 속도는 6.0 ft/s 및 튜브 수는 65,526개로 되어있고, 해수 총 유량은 858,000 gpm(6대)이다.
- 마. 설계 복수기압력 38.1 mmHgA이고, 해수온도 입구온도는 20.5 °C 및 출구온도는 28.72 °C이다
- 바. 총괄 열전달 계수는 420.72 btu/hr · ft^2 · °F이다.
- 사. 저압터빈 배기온도는 33.16 °C 이고, 종단온도차(저압터빈 배기온도 -해수출구온도)는 4.44 °C 이다.
- 아. 대수적 평균온도차는 7.844 °C 에 튜브 청결도는 85 %이다.
- 자. 불응축가스 유량은 337.5 lb/hr이다.

2. 저압터빈 배압과 복수기 압력

가. 저압터빈 배압

- (1) 저압터빈과 복수기 접합면 위측 압력이며 저압터빈 배기온도에 대한 포화압력으로 부터 구할 수 있다.(한빛 2,3발전소 측정지점)
 - 표준형(OPR 1000) 발전소인 경우 저압터빈 배기측에 설치 운영되고 있다.
- (2) Rankine 사이클에서 효율 계산시 저압터빈 배압을 사용한다.
- (3) 터빈 특히 저압터빈 성능에 큰영향을 주기 때문에 매우 중요한 인자이다.
- (4) 복수기 압력은 일반적으로 저압터빈 배기측 아래에서 측정함. 압력 감지 탭은 고속의 증기로부터 영향을 받지 않도록 바스켓내에 설치되어 있다.

나. 복수기 압력

- (1) 복수기 튜브 첫째열 상부의 압력(한빛 1,2호기 측정 지점)을 확인했다.
 - 복수기 튜브 상부로부터 1ft 위에 설치(터빈 건물 약 98ft)되었다.
- (2) 복수기에서 해수온도가 가장 낮은 튜브 입구측 응축기 지역에 설치한다.
- (3) 복수기 압력이 낮을수록 저압 터빈내에서 증기를 최대로 팽창시켜 효율을 증대시킨다.
- (4) 저압터빈 배압과 복수기 압력은 복수기 Neck으로 인해 같지 않을 수 있다.

다. 현 복수기 압력 측정 방법 문제점

- (1) 저압터빈 배기측 압력보다 낮게 지시한다.
- (2) 저압터빈 배기측 압력을 정확히 알 수 없다.
- (3) 부정확한 복수기 압력 지시 및 발전기 출력 불일치(보정계수 부정확)한다.
- (4) 복수기 청결도 저하 진행 상태 인지 및 청결도 평가 부정확하다.

3 . 복수기 성능 영향인자

가. 영향인자 검토

- (1) 복수기 튜브 플러깅(Plugging) 상태 및 플러깅 개수에 대해서 검토했다.
- (2) 복수기 튜브 파울링(Fouling)의 영향을 검토했다.
- (3) 냉각수 즉 순환수 유량 감소에 대해서 검토했다.

- (4) 계절적인 영향으로 냉각수 고온(하절기)에 대해서 검토했다.
- (5) 복수기내로 불응축성 가스 유입 유로를 검토했다.
- (6) 복수기 공기 추출기를 통한 불충분한 공기제거에 대해서 검토했다.
- (7) 복수기로 다수의 고에너지 증기 누설부위를 검토했다.

나. 복수기 압력 변수에 따른 운전변수 추이곡선

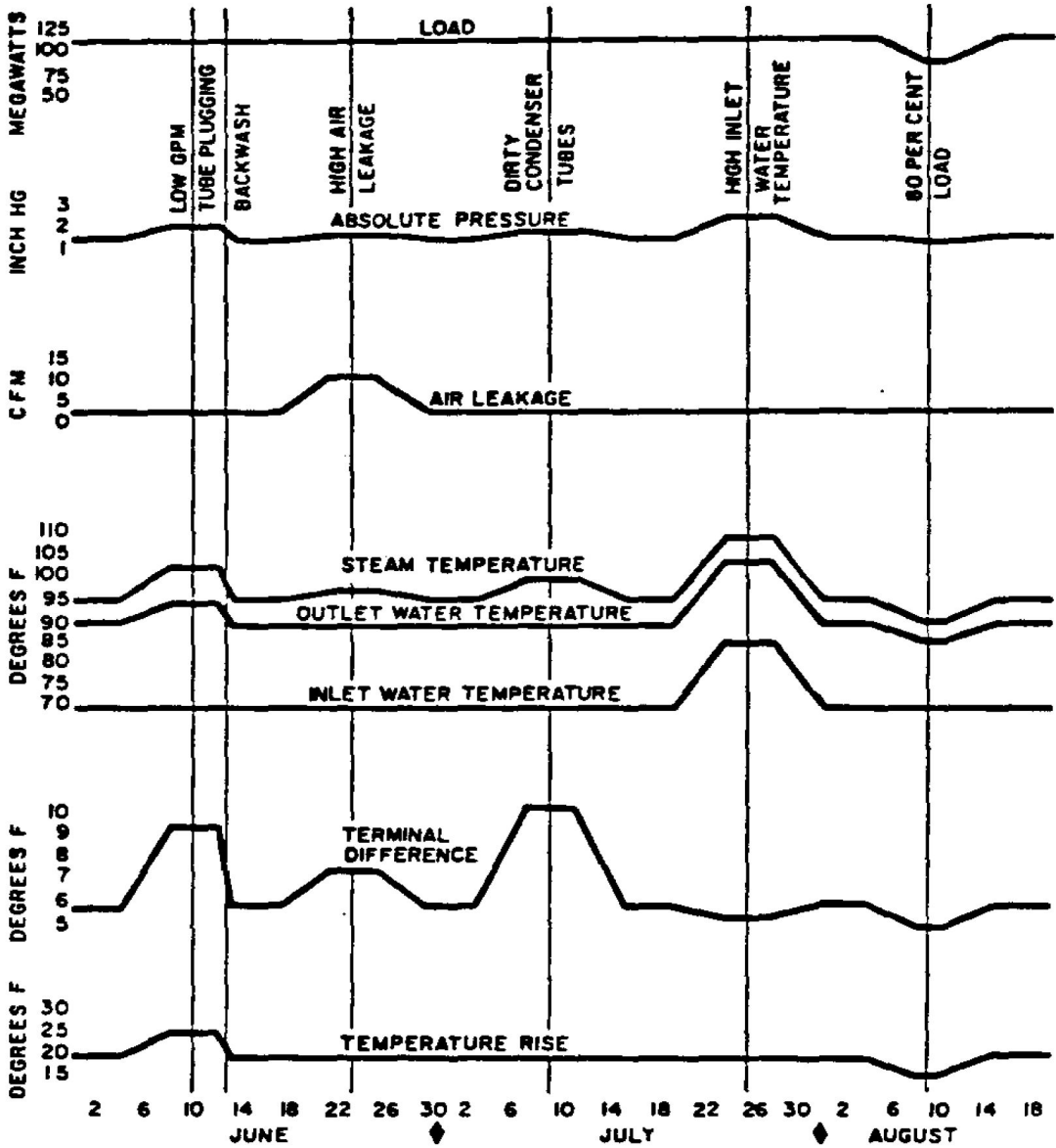


그림 3.1.1 복수기 압력 변수에 따른 운전변수 추이곡선

다. 복수기 영향인자와 압력 관계

표 3.1.1 복수기 영향인자와 압력 관계

영향 인자 영향 받는 인자	순환수 유량 감소	복수기 관막음	역세척	공기 유입량 증가	복수기관 이물질 누적	냉각수 입구온도 고온	터빈 부하 감소
복수기 절대 압력	증가	증가	감소 후 정상 값	증가	증가	증가	감소
공기 유입량	변화 없음	변화 없음	변화 없음	증가	변화 없음	변화 없음	변화 없음
저압터빈 배기온도	증가	증가	감소 후 정상 값	증가	증가	증가	감소
냉각수 출구온도	증가	증가	감소 후 정상 값	변화 없음	변화 없음	증가	감소
냉각수 입구온도	변화 없음	변화 없음	변화 없음	변화 없음	변화 없음	증가	변화 없음
중단 온도차¹⁾	증가	증가	감소 후 정상 값	증가	증가	변화 없음	감소
냉각수 입·출구 온도차	증가	증가	감소 후 정상 값	변화 없음	변화 없음	변화 없음	감소
복수내 용존산소	변화 없음	변화 없음	변화 없음	증가	변화 없음	변화 없음	변화 없음
발전기 출력	감소	감소	증가 후 정상 값	감소	감소	감소	감소

1) 중단 온도차(TTD, Terminal Temperature Difference) : 저압터빈 배기온도 - 냉각수 출구온도

제 2 절 운전 현황

1. 검토 조건(주제어실 지시계 기준임)

가. 한빛1호기 출력 95.6 % 및 한빛2호기 출력 100 %(열출력 2,785MWt)

나. 발전기 출력은 996.671 MWe

(1) 순환수펌프 6대 운전 기준(한빛2발 : 5대, 한빛3발 : 5대 운전 중)이다.

(2) 설계 복수기압력 38.1 mmHgA 이고, 해수온도 입구온도는 20.5 ℃ 및 출구온도는 28.72 ℃이다

2. 운전 현황 비교(붙임. 5, 붙임. 8)

가. 한빛 1,2호기 발전소 운전초기 해수 최대온도에서 출력비교

표 3.2.1 한빛 1,2호기 발전소 운전초기 해수 최대온도에서 출력비교

호기 운전변수	한빛1호기	한빛1호기	한빛2호기	한빛2호기
정격 출력(MWe)	996	996	984	984
최대 해수온도(℃)	28(출구 37) (’86.8.19)	27(출구 36) (’86.8.29)	27.5(출구 35.5) (’88.8.10)	28(출구 36) (’88.8.26)
복수기 압력(mmHgA)	52	46	52.5	55
저압터빈배기 온도(℃)	40	38	40.3	41
저압터빈배기 압력(mmHgA)	55.3	49.7	56.2	58.3
순환수펌프 운전수	6	6	6	6
발전기 출력(MWe)	978	980	970	970
출력편차 (MWe)	18(1.8%)	16(1.6%)	14(1.4%)	14(1.4%)

(1) 저압터빈 배기온도를 저압터빈 배기압으로 환산한 결과이다.

□ 복수기 압력값이 저압터빈 배압에 비해 3.3 ~ 3.7 mmHgA 낮게 지시한다.

나. 2010년 해수 최대온도에서 출력비교

표 3.2.2 2010년 해수 최대온도에서 출력비교

호기 운전변수	한빛1호기	한빛2호기	한빛3호기	한빛5호기	고리4호기
정격 출력(MWe)	996	996	1,049	1,050	1,043
최대 해수온도(℃) '10.8.11 12:00	31.02 (출구 40.80)	30.8 (출구 39.66)	30.96 (출구 39.50)	30.55 (출구 37.56)	24.94 (출구 32.88)
복수기 압력(mmHgA)	62.04	57.97	57.2	58.3	45.7
저압터빈배기 온도(℃)	45.14	43.72	-	-	36.6
저압터빈배기 압력(mmHgA)	72.4	67.3	57.33	58.0	46.1
순환수펌프 운전수	6	6	6	5	5
발전기 출력(MWe)	962.9	968.3	1,034.3	1,037.6	1,034.8
출력편차 (MWe)	33.1(3.32%)	27.7(2.78%)	14.7(1.4%)	12.4(1.18%)	8.2(0.8%)

(1) 저압터빈 배기온도를 기준으로 저압터빈 배기압으로 환산한 결과이다.

- ① 한빛1호기는 복수기 압력값이 저압터빈 배압에 비해 10.36 mmHgA 낮게 지시한다.
- ② 한빛2호기는 복수기 압력값이 저압터빈 배압에 비해 9.33 mmHgA 낮게 지시한다.

③ 한빛3,5호기는 저압터빈 배기압을 지시한다.

④ 고리4호기는 복수기 압력값이 저압터빈 배압에 비해 0.4 mmHgA 낮게 지시한다.

다. 2011년 해수 최대온도에서 출력비교

표 3.2.3 2011년 해수 최대온도에서 출력비교

호기 운전변수	한빛1호기	한빛2호기	한빛3호기	한빛5호기	고리4호기
정격 출력(MWe)	996	996	1,049	1,050	1,043
해수온도(℃) '11.07.24 14:00 복수기	27.36 (출구 35.95)	26.89 (출구 36.66)	27.2 (출구 36.30)	26.94 (출구 33.98)	21.62 (출구 31.07)
압력(mmHgA)	52.6	49.82	50.74	50.93	42.88
저압터빈배기 온도(℃)	41.62	40.2	39.64	40.0	36.77
저압터빈배기 압력(mmHgA)	60.30	55.92	54.28	55.32	46.48
순환수펌프 운전수	6	6	6	5	4
발전기 출력(MWe)	979.6	979.9	1,045.0	1,048.84	1,019.1
출력편차 (MWe)	16.4 (1.65%)	16.1 (1.62%)	-	-	-

(1) 저압터빈 배기온도를 기준으로 저압터빈 배기압으로 환산한 결과이다.

① 한빛1호기는 복수기 압력 값이 저압터빈 배압에 비해 7.7 mmHgA 낮게 지시한다.

② 한빛2호기는 복수기 압력 값이 저압터빈 배압에 비해 6.1 mmHgA 낮게 지시한다.

※ 단, 해수온도가 2010년 31.02 ℃ 보다 낮은 27.3 ℃로 같은 해수온도일 경우 2011년도 값도 2010년과 유사할 것으로 추정된다.

③ 한빛5호기와 고리4호기는 순환수펌프 6대 미만 운전으로 검토에서 제외한다.

3. 복수기 튜브 플러깅(2010년 기준)

가. 한빛1호기는 복수기 튜브 65,526개중 1,260개를 판막음 되었다.

(1) 한빛2호기 복수기 튜브 관막음수도 1호기와 거의 같다.

나. 복수기관 전열면적 1,029,250 ft² 중 19,792 ft²(1.92 %) 감소시킨다.
다. 해수온도 20.5 °C 기준 복수기 압력을 0.35 mmHgA 증가시킨다.

4. 복수계통 용존산소 추이곡선('10.01.01 ~ '11.07.15)

가. 한빛1호기

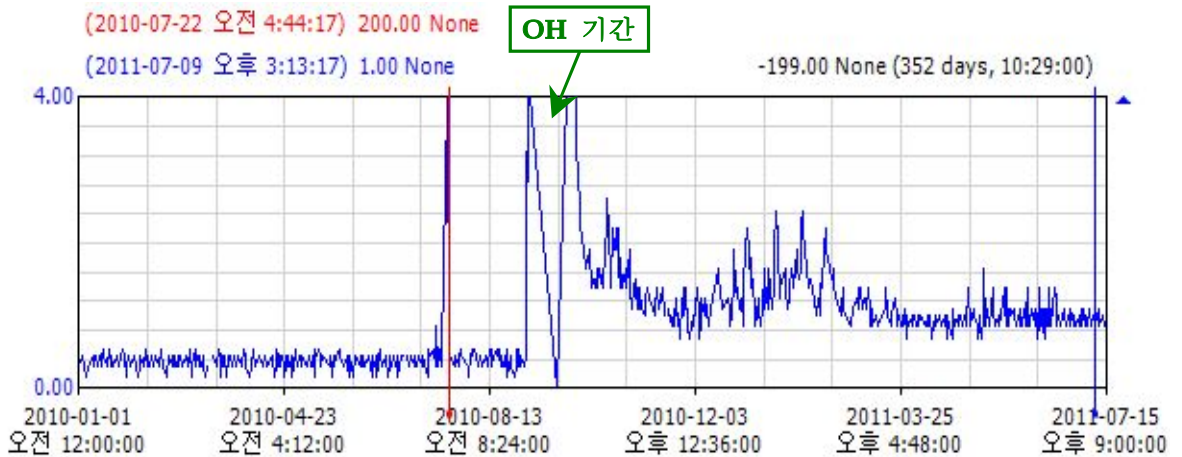


그림 3.2.1 복수계통 용존산소 추이곡선(한빛1호기)

(1) 용존산소는 1.2 ppb로 제한값 5 ppb보다 낮은값을 유지하나 '10년도 0.4 ppb에 비해 3배 정도 높은 상태이다.

(2) 따라서 외부에서 공기 유입이 진행되고 있음을 나타내고 있다.

나. 한빛2호기(온라인 감시용 용존산소 분석기 점검 중)

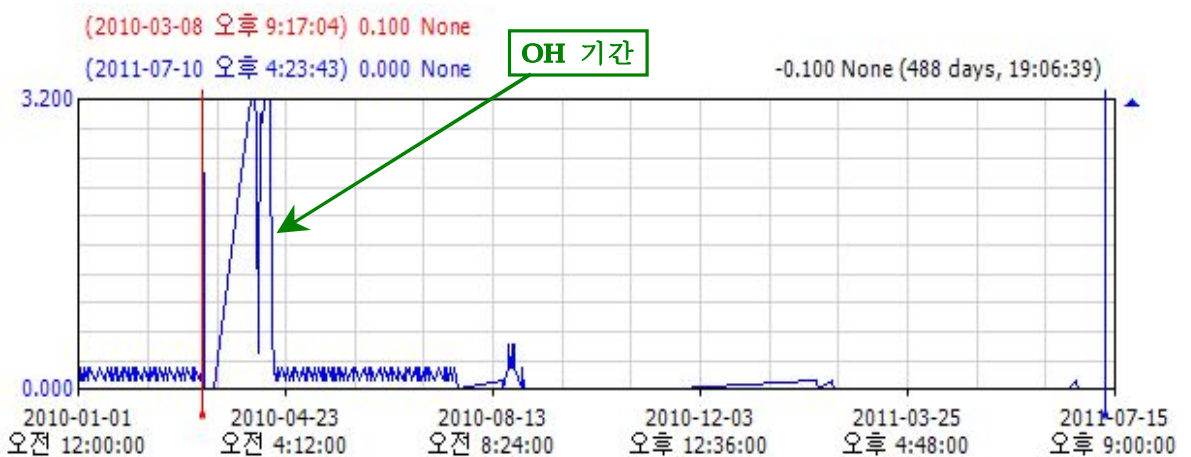


그림 3.2.2 복수계통 용존산소 추이곡선(한빛2호기)

- (1) 용존산소는 1호기에 비해 0.3 ppb로 매우 낮은 상태 유지중 이다.
- (2) 따라서 외부에서 공기 유입이 진행되고 있으나 아주 적은 양으로 추정된다.

5. 복수기 공기 추출기 용량 제한

가. 정상 출력운전중 복수기내로 유입되는 불응축성 가스량 : 337.5 lb/hr

- (1) 계통 화학제어제로부터 생성된 용존산소 제어제인 N_2H_4 가 산소와 결합 후 질소 가스가 생성되고 고온에서 NH_3 로 전환과 산화질소 생성된다.
- (2) 외부 공기 유입 등이 있다.

나. 증기분사 공기추출기 2대(5%×2) 운전시 역류발생으로 1대 운전 중 다. 복수기내 일정량의 불응축성 가스 존재로 복수기 전열관에 Air Binding 존재

제 3 절 복수기 성능 저하 원인 분석

1. 복수기 성능 진단 차트

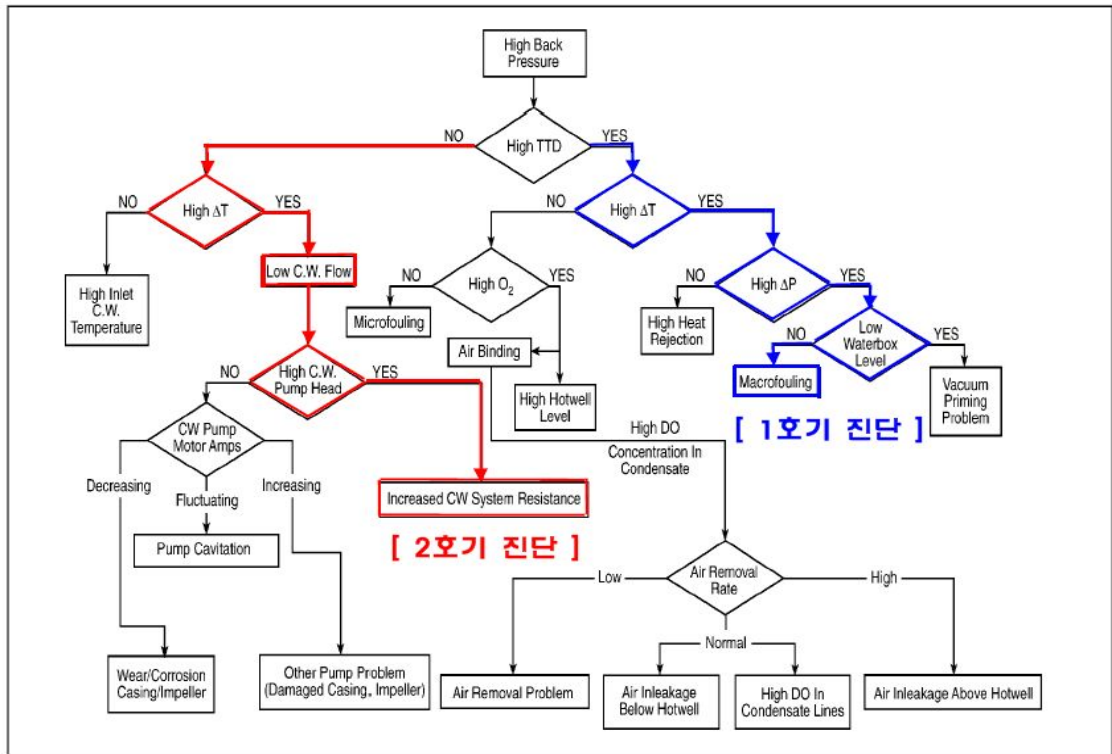


그림 3.3.1 복수기 성능 진단 차트

2. 복수기 성능 진단 변수 비교

표 3.3.1 복수기 성능 진단 변수 비교

성능 진단변수 변수 비교시기		TTD	TTD 설계값	$\Delta T^2)$	ΔT 설계값	LMTD ³⁾	LMTD 설계값	CWP 운전 대수
준공 직후	한빛1호기	3.0	4.44	9	8.22	6.49	7.844	6대
	한빛2호기	5.0	4.44	8	8.22	8.37	7.844	6대
'10년도	한빛1호기	3.97	4.44	9.78	8.22	7.87	7.844	6대
	한빛2호기	2.94	4.44	8.86	8.22	6.38	7.844	6대
	한빛3호기	-	3.88	8.54	8.78	-	7.15	6대
	고리4호기	3.72	4.23	7.94	7.19	7.47	7.256	5대
'11년도	한빛1호기	5.67	4.44	8.59	8.22	9.31	7.844	6대
	한빛2호기	3.54	4.44	9.77	8.22	7.38	7.844	6대
	한빛3호기	3.34	3.88	9.1	8.78	6.92	7.15	6대
	고리4호기	5.7	4.23	9.45	7.19	9.67	7.256	4대

3. 한빛1호기 분석

가. 종단 온도차(TTD, Terminal Temperature Difference)

(1) 최근 TTD 값이 5.67 °C로 설계값인 4.44 °C를 초과하고 있다.

나. 복수기 해수 입·출구온도차

(1) 복수기 해수 입·출구온도차는 8.59 °C로 설계값 8.22 °C을 초과한다.

(2) 위 결과로 분석하면 순환수펌프 또는 계통내 유량 흐름 저항으로 순환수 유량이 설계값보다 적다.

(3) 복수기 해수 입·출구온도차는 8.59°C에서 1호기 순환수 유량 계산결과이다.

$$\square Q_{cw}(btu/h) = m_{cw}(lbm/h) \cdot c_p(btu/lbm^\circ F) \cdot (T_H - T_C)(^\circ F)$$

$$\square m_{cw} = \frac{Q_{cw}}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{6,362,802,407}{1 \times 15.462} = 411,512,250(lbm/h) = 821,937(gpm)$$

2) ΔT : 복수기 해수 입·출구온도차

3) LMTD(Log mean temperature difference) : 대수적 평균온도차(°C)

- 순환수 유량은 설계유량 858,000(gpm)에 비해 36,063(gpm), 즉 4.2 %가 부족하다.
- 순환수 유량감소 원인은 펌프 성능저하, 해수관로 저항, 이물질여과기 막힘, 튜브 청소계통 스크린 막힘 등이 있다.
- 복수기로 다수의 고에너지 증기 누설이 발생할 경우에도 복수기 해수 입·출구 온도차가 증가된다.

다. 위 결과로 분석하면 1호기 복수기는 청결도가 저하되었고 또한 복수기내 불응축성 가스가 유입과 순환수 유량이 부족함을 알 수 있다.

(1) 한빛1호기 청결도 = $\frac{U_{Test}}{U_{Design}} = \frac{340.296}{420.696} = 80.89\%$, $U_{Test} = \frac{Q}{A \Delta T}$

- 청결도 설계값 85 %에 대한 80.8 %임(=68.76 %)을 알 수 있다.
- 청결도에는 전열관내 빨이나 진흙 침적, 해양생물 부착 및 성장 등이 직접적으로 영향을 준다.

4. 한빛2호기 분석

가. 종단 온도차(TTD, Terminal Temperature Difference)

- (1) 최근 TTD 값이 3.54 °C로 설계값 4.44 °C 이내이다.

나. 복수기 해수 입·출구온도차

- (1) 복수기 해수 입·출구온도차는 9.77 °C로 설계값 8.22 °C를 초과한다.

다. 위 결과로 분석하면 2호기 순환수펌프 또는 계통내 유량 흐름 저항으로 순환수 유량이 설계 값보다 적다.

또한 복수기내로 불응축성 가스가 1호기에 비해 적지만 유입됨을 알 수 있다.

(1) 한빛2호기 청결도 = $\frac{U_{Test}}{U_{Design}} = \frac{401.998}{420.696} = 95.55\%$, $U_{Test} = \frac{Q}{A \Delta T}$

- 청결도 설계값 85 %에 대한 95.55 %임(=81.22 %)
- (2) 복수기 해수 입·출구온도차는 8.7 °C에서 2호기 순환수 유량 계산결과이다.

□ $Q_{cw} (btu/h) = m_{cw} (lbm/h) \cdot c_p (btu/lbm \cdot ^\circ F) \cdot (T_H - T_C) (^\circ F)$

□ $m_{cw} = \frac{Q_{cw}}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{6,362,802,407}{1 \times 15.56} = 408,920,463 (lbm/h) = 816,760 (gpm)$

- 순환수 유량은 설계유량 858,000(gpm)에 비해 41,239(gpm), 즉 4.8 %가 부족하다.

- 순환수 유량감소 원인은 펌프 성능저하, 해수관로 저항, 이물질여과기 막힘, 튜브 청소계통 스크린 막힘 등이 있다.
- 복수기로 다수의 고에너지 증기 누설이 발생할 경우에도 복수기 해수 입·출구 온도차가 증가된다.

5. 복수계통 용존산소 농도 및 복수기내 Air Binding 존재

가. 용존산소는 1.2 ppb로 제한 값 5 ppb보다 낮은 값을 유지하나 '10년도 0.4 ppb에 비해 3배 정도 높은 상태이다.

나. 증기분사 공기추출기 1대 운전 중 복수기진공펌프 월간 점검시 터빈 출력 순환수 온도가 일정한 상태에서 복수기압력 감소된다.

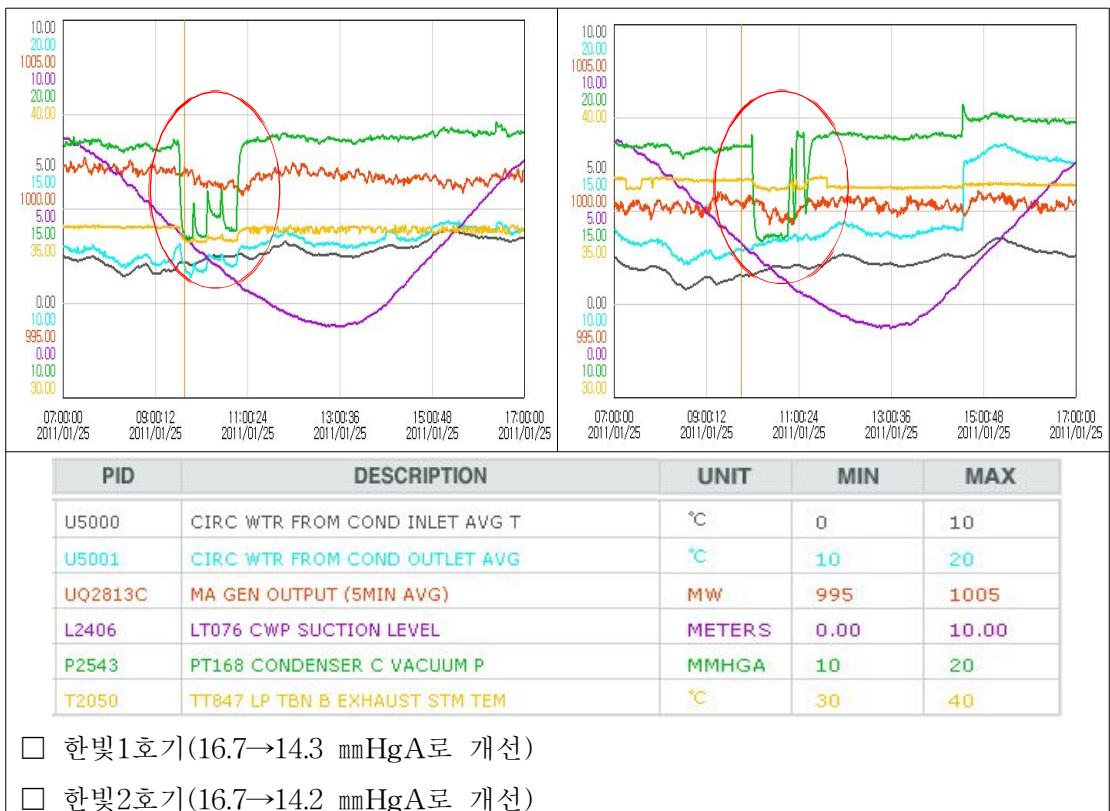


그림 3.3.2 복수기 진공펌프 운전시 복수기 압력변화(1/2)

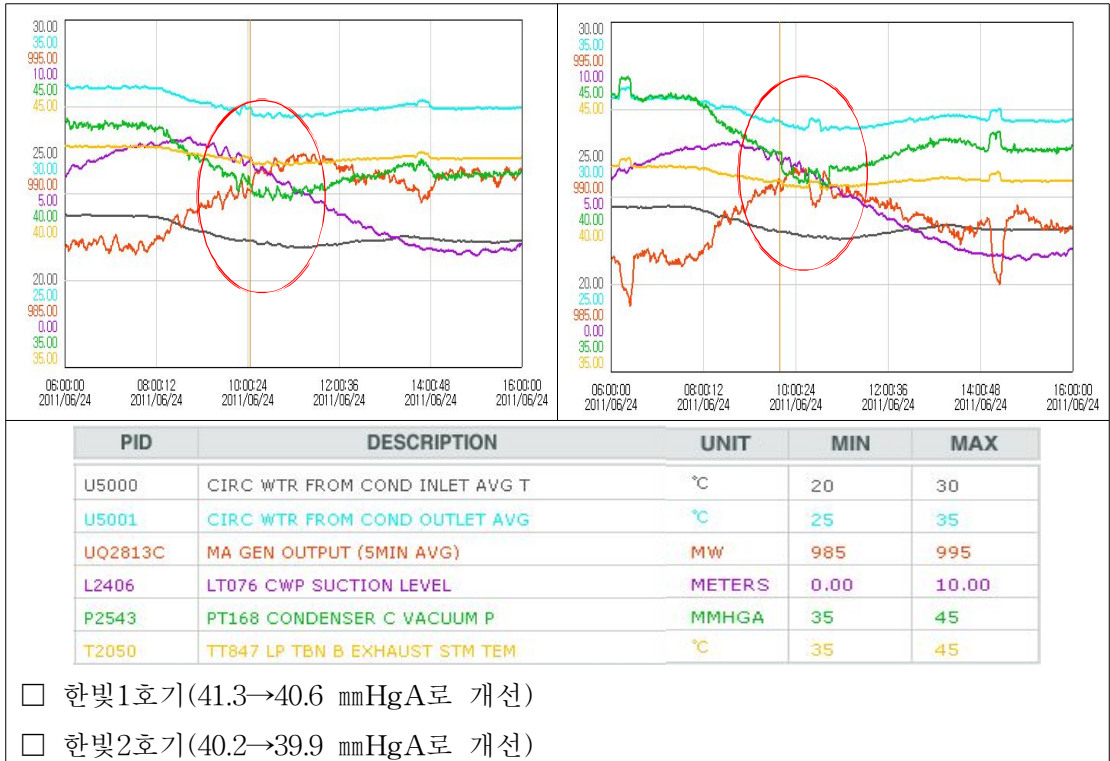


그림 3.3.3 복수기 진공펌프 운전시 복수기 압력변화(2/2)

(1) 해수온도가 높은 상태에서 진공펌프 추가 기동시 복수기 압력 개선효과는 미미하다.

- ① 전열관에서 열전달이 지배적이기 때문에 Air Bound 증상이 크게 나타나지 않는다.
- ② 복수기 전열면 열전달을 감소시켜 복수기 전열관의 열전달을 감소시킨다.

다. 부하감발시 복수기압력은 감소되나 Air Bound 상태일 경우 복수기 압력이 감소후 일정하게 유지한다.

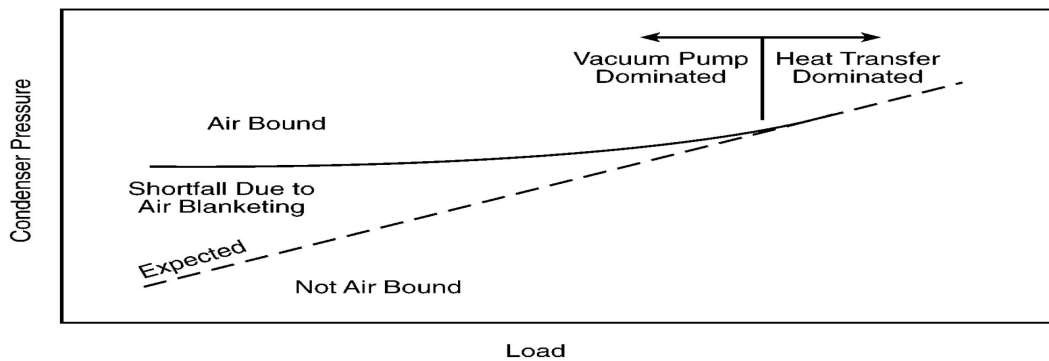


그림 3.3.4 부하 감발시 복수기 압력 및 Air Bound 상태

6. 복수기 튜브 플러깅

가. 해수온도 20.5 °C 기준 복수기 압력을 0.35 mmHgA 증가시킨다.

나. 해수온도 30 °C에서는 복수기 압력을 0.5 mmHgA 증가시켜 발전기 출력을 약 0.63 MWe 감소시킨다.

7. 저압터빈 특성에 따른 복수기 압력 증가시 출력결손

표 3.3.2 저압터빈 특성에 따른 복수기 압력 증가시 출력결손

저압터빈 배기압력(mmHgA)	보정계수(%)	
	한빛 1발전소	한빛 2, 3발전소
19.05	0.65	0.30
25.40	0.57	0.29
31.75	0.31	0.22
38.10	0.00	0.00
44.45	-0.50	-0.38
50.80	-1.00	-0.81
57.15	-1.60	-1.41
63.50	-2.30	-2.08
69.85	-3.05	-2.70
76.20	-3.80	-3.50
82.55	-4.43	
88.90	-5.12	

(1) 한빛1호기인 경우 2010년도 최대해수온도 31.02 °C에서 발전기 출력이 962.9 MWe로 출력 보정값은 -3.32 %로 이때 복수기 배기압력은 72.39 mmHgA로 예상된다.

제 4 장 개선방안

제 1 절 복수기 전열관 세정계통 운전방법 개선을 통한 냉각수 유량 확보

1. 복수기 전열관 세정계통 운전 후 상·하부 스크린 개방상태 유지

가. 상·하부 스크린(Mesh 3/8")을 상시 닫힘 상태 유지(현 운전 방식)시 단점

- (1) 스크린에서 해양생물 성장 및 이물질 누적으로 복수기 냉각수 유량을 제한한다.
- (2) 순환수펌프 유량 감소로 복수기 입·출구 온도차가 증가된다.
- (3) 닫힘상태 유지할 경우 이물질이 스크린표면에 축적되어 불 수집률 감소한다.
- (4) 복수기 전열관 열전달 효율 감소로 복수기 압력 증가 및 발전소 출력감소된다.

나. 복수기 전열관 세정계통 불 재순환 및 수집 후 상·하부 스크린 개방

- (1) 유로 차단면적이 적은 하부 스크린 개방시 발전기 출력이 증가 된다.
- (2) 스크린 면적이 관로 전체를 차지하는 상부스크린 개방시 효과증대가 예상된다.
- (3) 주기적으로 역세척을 수행하여 스크린 표면을 항상 청결상태 유지하도록 권고하고 있다.(공급자 지침서)

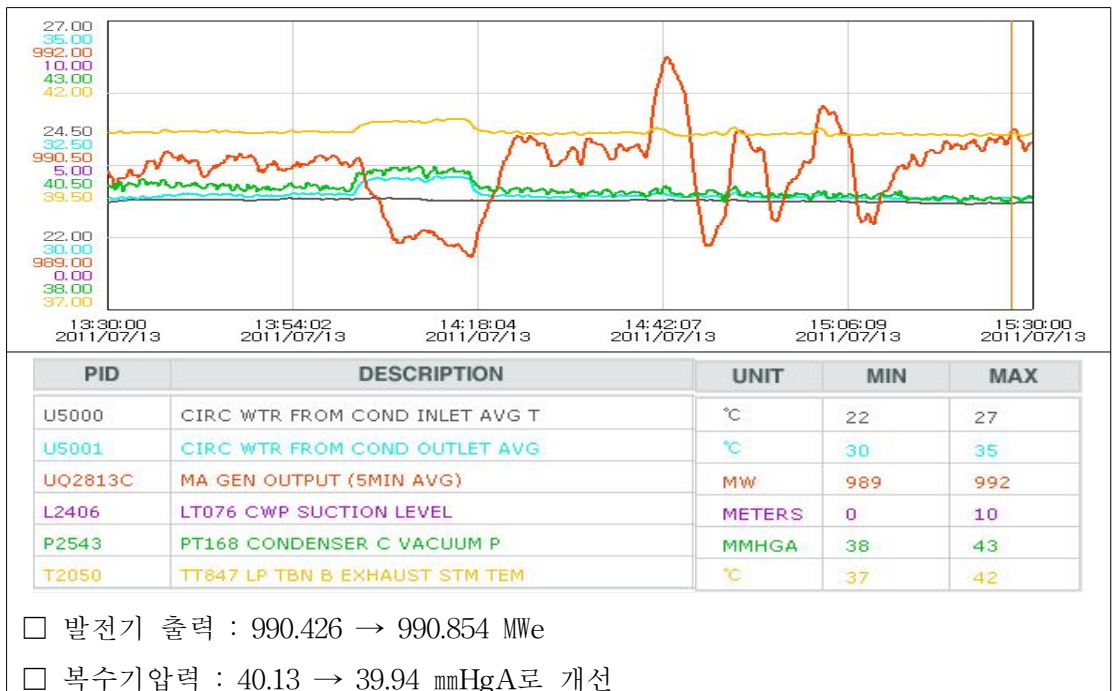


그림 4.1.1 복수기 전열관 세정계통 운전 후 상,하부 스크린 개방시 출력변화

다. 상·하부 스크린 차압 측정설비 정상화 및 차압 “고”에서 자동 운전

- (1) 차압측정설비에 빨 유입 및 퇴적으로 차압측정기 고장이 자주 발생한다.
- (2) 이물질 누적으로 차압이 100 mmH₂O 이상시 자동 역세척 운전을 한다.
- 차압이 356 mmH₂O 이상시 비상 역세척 운전을 한다.(스크린 손상방지)

2. 복수기 입구 Debris Filter 운전방법 개선

가. 현 Debris Filter 수동 세정운전 방법을 차압 설정값에서 자동 운전

- (1) 각 DF당 2회/day(총 6회×2개씩/day) 수동 세정으로 출력손실이 크다.

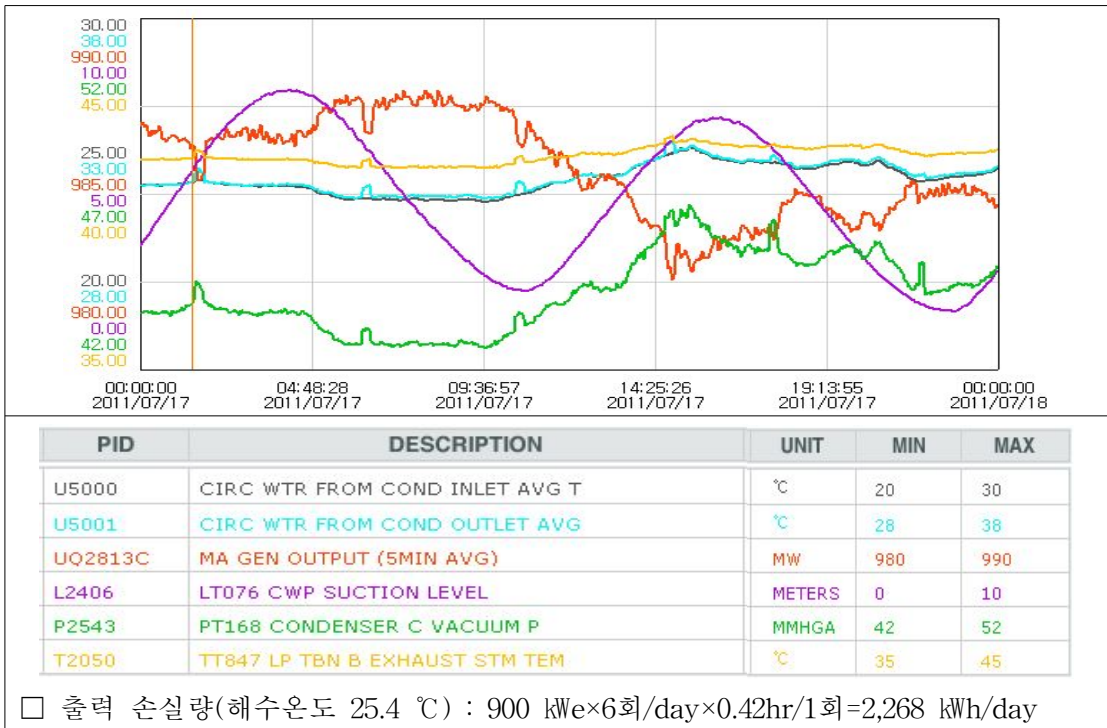


그림 4.1.2 복수기 입구 Debris Filter 운전방법 개선 후 출력변화

나. Debris Filter 차압 지시 및 스위치 정상화

- (1) 차압측정설비에 빨 유입 및 퇴적으로 차압측정기 고장이 자주 발생한다.
- (2) 차압 측정설비 건진성을 유지한다.

다. Debris Filter 차압 “고”에서 자동 운전

- (1) DF에 이물질 누적으로 차압이 254 mmH₂O 이상시 자동 세척운전을 한다.

순환수펌프 추가 기동 전 세척운전을 시행한다.

(2) DF 운전시 복수기로 통과하는 냉각수량 중 10 %를 우회시킨다.

3. 복수기 전열관 정상화를 통한 냉각수 유량 및 전열면적 확보

가. 현상태

(1) 전열관 외곽열(2열)에 이물질 낙하로 인한 파손으로 해수 누설방지위한 예방으로 관막음 상태이다.

(2) 외곽열에 위치하는 관막음 전열관은 내부에 공기가 채워져 있어 열전달을 방해 (Blanketing 역할, 단열)한다.

나. 개선을 통한 냉각수 유량 및 전열면적 확보

(1) 정상운전중인 부품 등 기타 파편이나 계획예방정비 기간 중 복수기 상부지역 작업시 이물질 낙하로 인한 전열관 손상 방지 설비 설치하여 운영한다.

(2) 전열관 측면과 상부에 이물질 차단을 하도록 견고한 철망 등의 보호망 설치 후 예방 관막음한 전열관 복구(운전 및 정비 중 이물질 차단)를 한다.

(3) 전열관에 직접 증기가 유도되는지 확인 후 증기 충돌 방지판을 분산유입 되도록 보강(전열관 침식방지)한다.

(4) 손상 전열관 교체 등이 있다.

제 2 절 복수기 전열관 오염 저감 개선

1. 복수기 전열관 세정계통 운전 기준 재설정

가. 해수수위 3m 이하에서 불 재순환 운전 후 수집

(1) 복수기 입·출구 해수 차압이 300 cmH₂O 이상에서 수행한다.

세정 불 순환에 필요한 충분한 차압 형성시 운전을 한다.

(2) 불 재순환 운전기간 중 Debris Filter 운전을 금지한다.

세정 불 순환에 필요한 차압 상실을 방지한다.

2. 순환수 펌프 6대 운전시 복수기 전열관 세정계통 운전 주기 연장

가. 하절기 해수온도 22℃ 이상에서는 순환수펌프 6대 운전 중이며 이때 복수기 전열관내 유속이 6 ft/s 유지됨

- (1) 전열관 오염을 일으키는 해양생물 부착 및 성장을 막기 위한 빠른 유속 유지한다.
- (2) 전열관 표면이 거칠 경우 해양생물 부착 방지위한 유속을 4 ~ 6 ft/s(매끄러운 표면일 경우 2 ~ 4 ft/s)로 한다.

※ 출처 : *Condenser Application and Maintenance Guide, EPRI, Palo Alto, CA: 2001. 1003088*

나. 복수기 전열관 청결도가 정상일 경우 복수기 세정계통 순환운전 주기 변경

- (1) 현재 월 ~ 금 순환운전을 1회/2주(4시간/회)로 연장하여 운전한다.
- (2) 해수수위 3 m 이하 기간에 운전한다.

3. 순환수 배관, 복수기 전열관 표면에 해양생물 부착 및 성장억제

가. 회전망 전단에 차아염소산나트륨 용액 주입

- (1) 12 % 차아염소산나트륨 저장탱크로부터 고농도의 차아염소 용액을 소량 주입(쇼크 처리)한다.
- (2) 잔류 염소 농도 3 ppm 유지한다.
- (3) 주기적으로 시료 채취 분석 수행한다.

4. 취수구 및 방출구 빨 제거

가. 복수기 전열관 오염원이 해양 생물의 취수구로부터 유입된 빨임

- (1) 전열관 표면에 침착된 빨로 인해 전열관 열전달 능력이 감소한다.
- (2) 종단 온도차(TTD) 증가 및 복수기 전열관 세정계통 불 수집률 감소 원인이 된다.

나. 펌프 침식 및 마모로 펌프 성능 저하 및 순환수 유량 감소 원인이다. 빨 퇴적 위치

- (1) Bar Screen 전방에 집중적으로 퇴적된다.
- (2) NSCW계통 전방에서 퇴적되어 점차 취수구 전지역으로 퇴적층이 확산된다.
(한빛1발전소 취수구 빨 퇴적량 : 약 0.7 ~ 1.4 m/년)

라. 퇴적된 빨 제거와 일정이상 퇴적 되기전 취수구 빨 제거

- (1) 복수기 튜브내 빨유입 감소로 복수기 효율 유지 및 발전소 출력 감소 방지한다.

5. 복수기 전열관 세정 필요(계획예방정비기간 중)

가. 기계적 세정(기계적 Scraper 및 Lancing)을 한다.

나. 복수기 전열관의 열제거 능력을 향상시켜 발전출력을 증가시킨다.

다. 복수기 전열관 세정방법으로 화학세정 방법 등이 있다.

6. 복수기 전열관 세정 설비 교체

가. 현상태(한빛1,2호기)

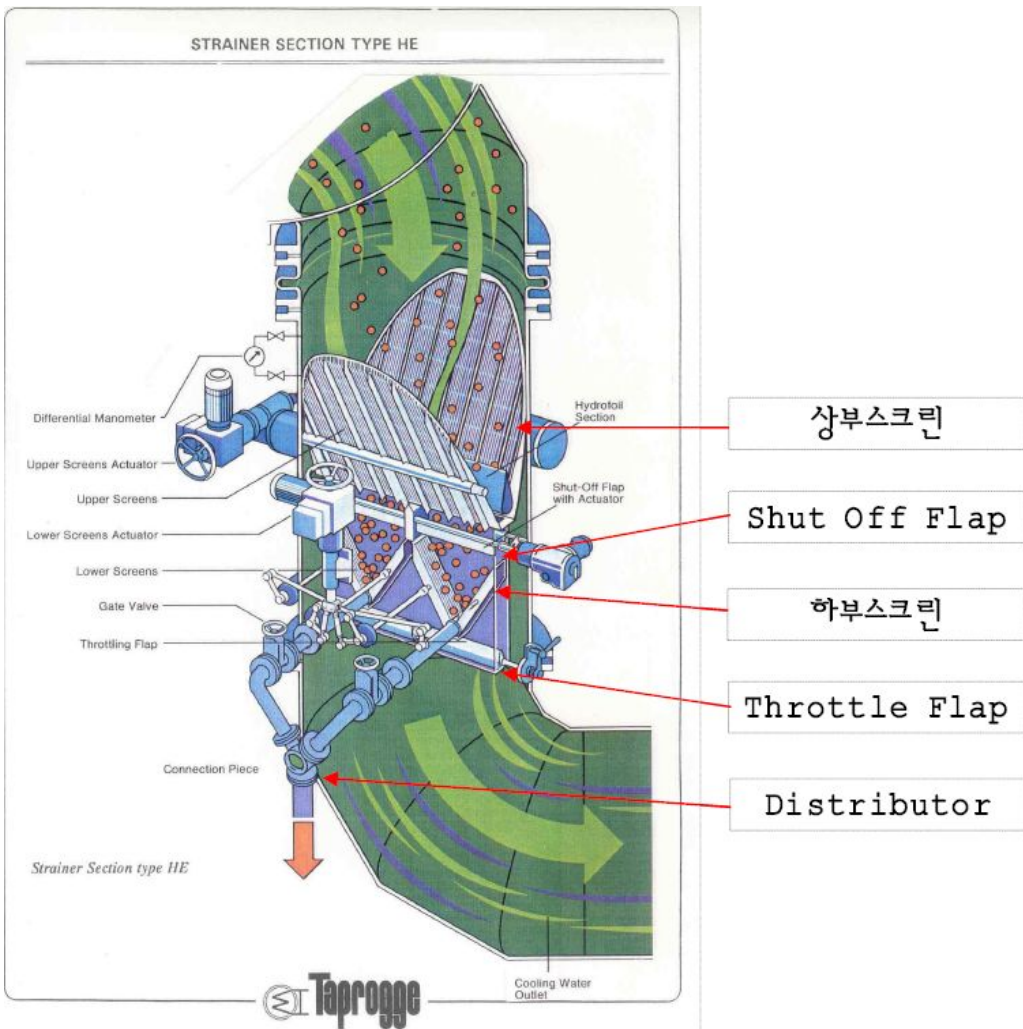


그림 4.2.1 복수기 전열관 세정 설비 교체 전 구조도(한빛 1발전소)

나. 개선설비(신고리1,2발전소)

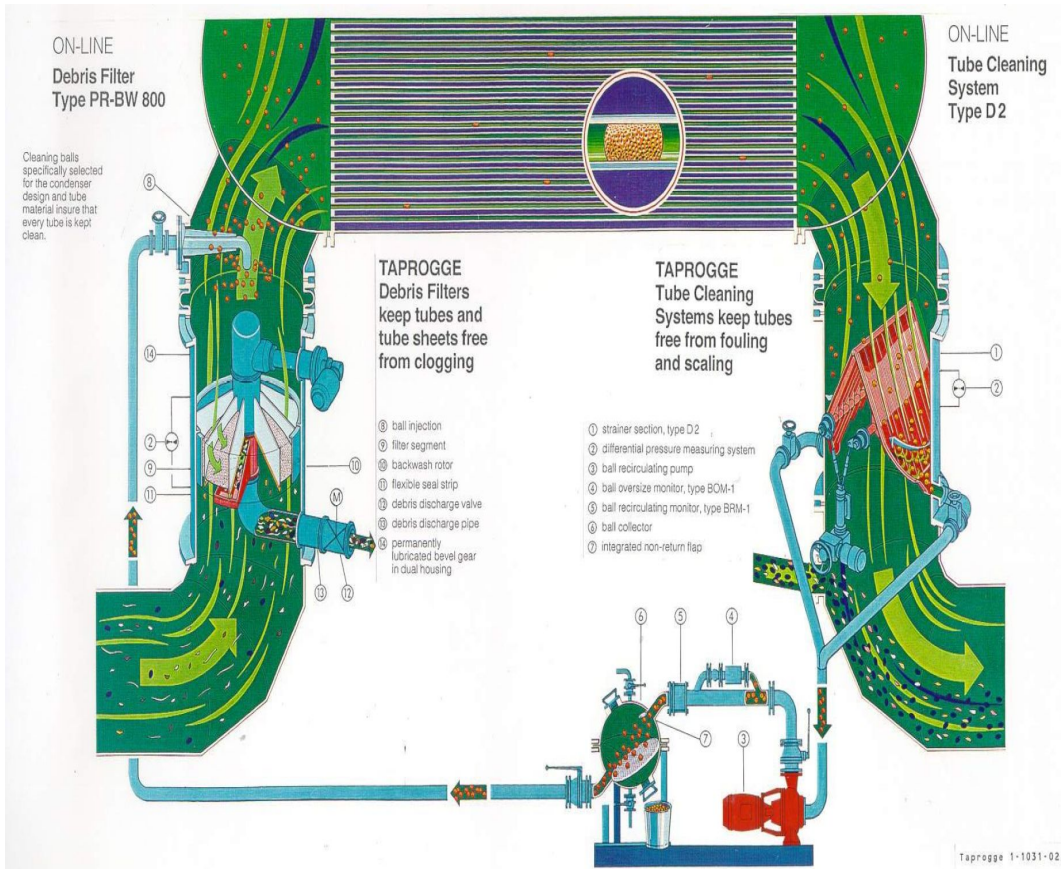


그림 4.2.2 복수기 전열관 세정 설비 교체 후 구조도(APR 1400 발전소)

다. 현설비 문제점

- (1) 상·하부스크린 간극이 발생하여 불 회수율이 낮다.
- (2) 상·하부 스크린으로 구성되어 복잡하다.
- (3) 유지 보수비용 과다하다.
- (4) 스크린에 이물질 침적시 불이 이물질과 함께 스크린에 부착된다.

라. 개선 설비 장점(현 한빛2,3발전소 사용 중)

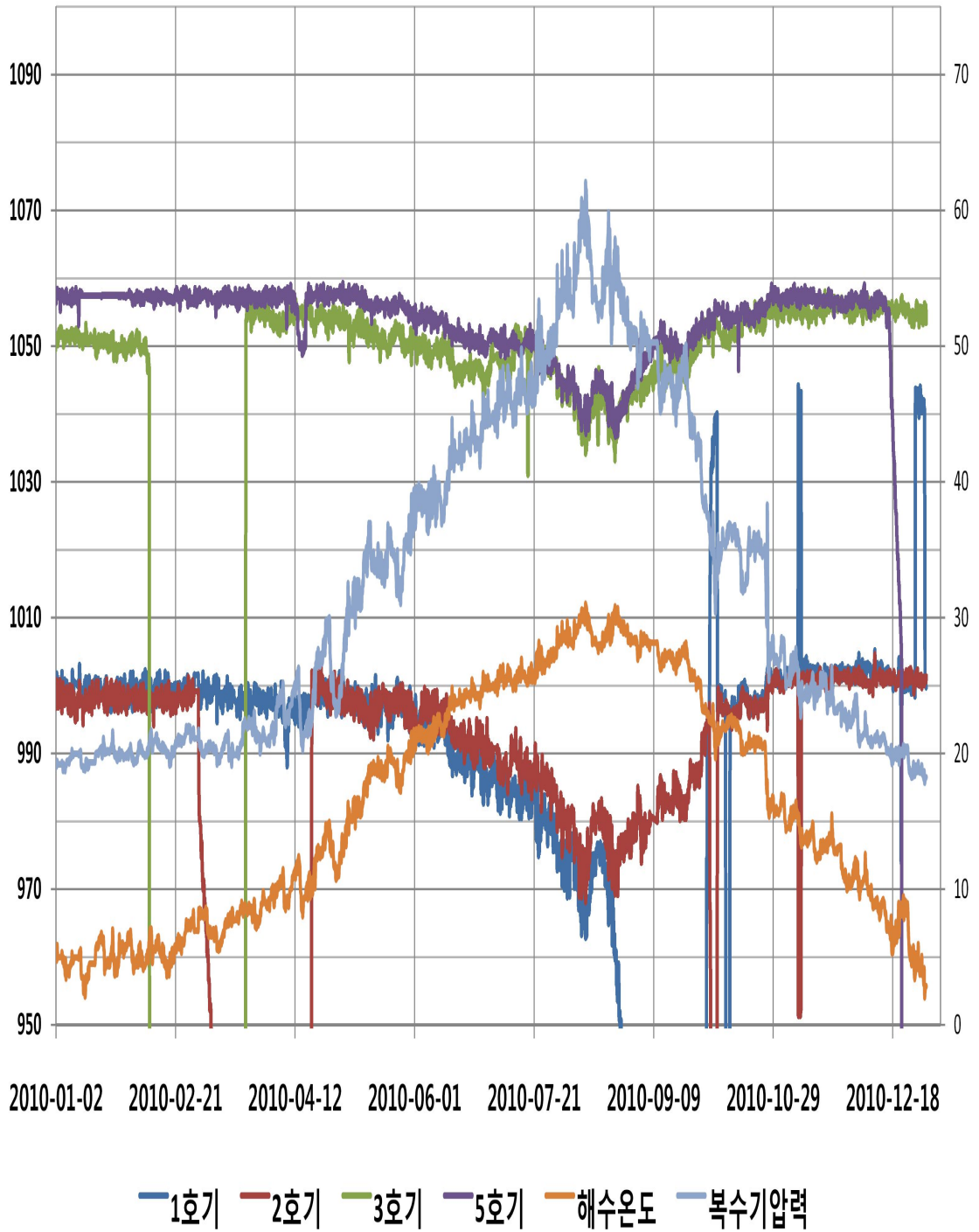
- (1) 스크린 구조가 간단하고 불 수집률이 높다.
- (2) 불 교체나 추가시 운전원 부담 경감한다.
- (3) 불 재순환펌프 1종류이다.(한빛1발 불 재주입펌프와 불 재순환펌프로 구성됨)
- (4) 유지 보수비용 저렴하다.

제 5 장 결론

본 연구를 통하여 알 수 있었던 내용은 한빛 1발전소 복수기 전열관 세정계통 운전방법 개선을 통한 냉각수 유량 확보로 진공도 향상 개선사항으로 첫 번째, 복수기 전열관 세정계통 운전 후 상,하부 스크린 개방상태를 유지하였고 두 번째, 복수기 입구 Debris Filter 운전방법을 개선하였으며, 세 번째 복수기 전열관 정상화를 통한 냉각수 유량 및 전열면적 확보를 하면서 이번 연구의 결과로 복수기 전열관 세정계통 불 재순환 및 수집 후 상,하부 스크린 개방으로 복수기 진공도 개선 약 0.19 mmHgA으로 발전기 출력이 약 0.5 MWe 상승하는 결과를 얻게 되면서, 원자력발전소 일일 판매단가 기준(60원/kWh)으로 약 1,400,000원(5억1천만원/년) 증대 효과를 얻게 되었다. 그리고 복수기 입구 Debris Filter 운전방법을 개선으로 순환수펌프 6대 운전 시 복수기 전열관 세정계통 운전주기를 연장함으로써 출력손실을 추가적으로 감소시키게 되었다.

- 붙임
1. 2010년 해수온도에 따른 복수기 압력 및 출력곡선
 2. 한빛 1발전소 및 각 발전소 복수기 설계사항 비교
 3. 원자력 발전소 랭킨 사이클 및 Mollier 선도
 4. 복수기 열전달 상관식
 5. 순환수 온도에 따른 복수기 압력
 6. 복수기 구조도
 7. 한빛 1발전소 저압터빈 배기압력에 따른 출력보정곡선
 8. 한빛 2, 3발전소 저압터빈 배기압력에 따른 출력보정곡선

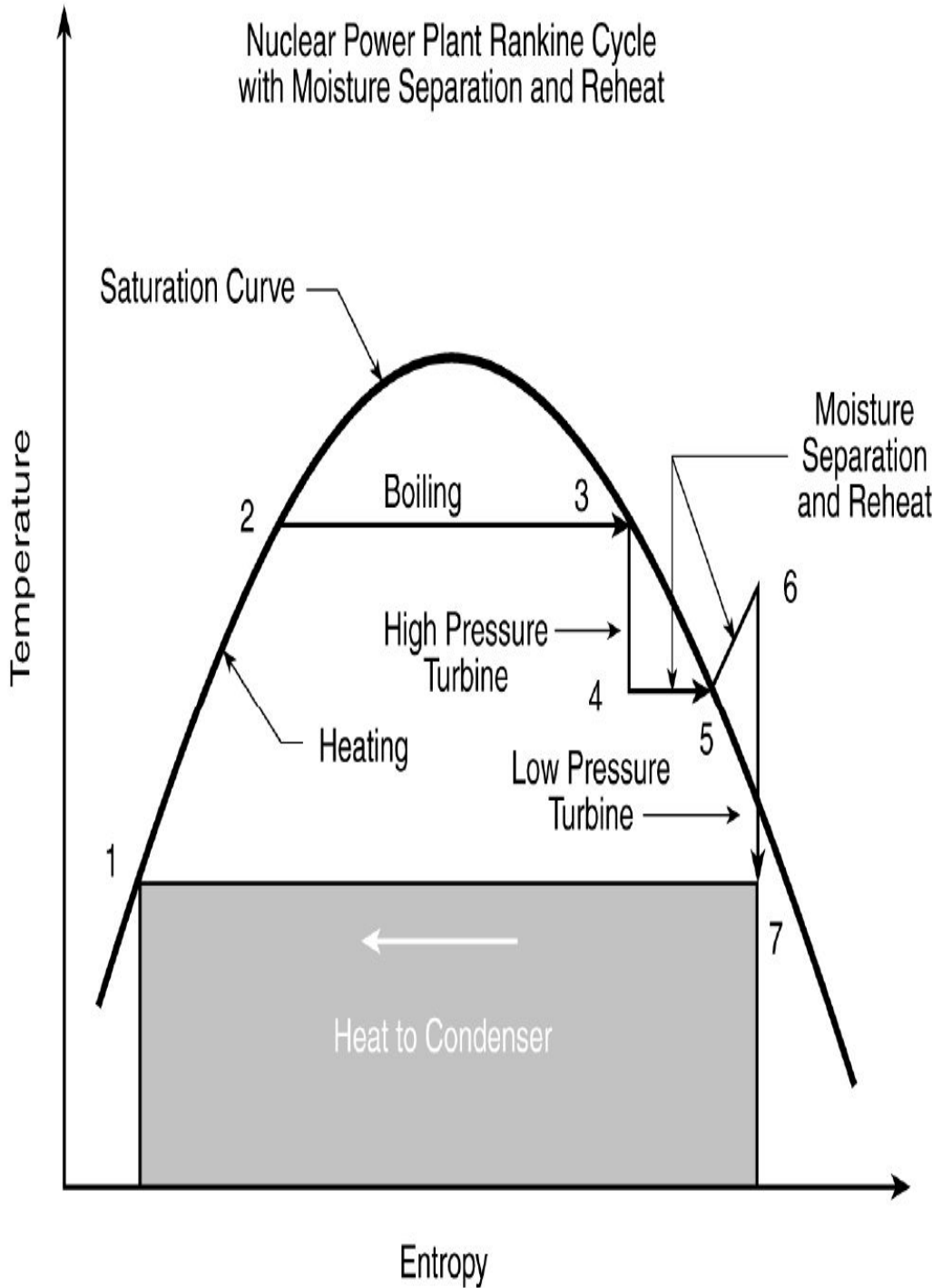
붙임 1. 2010년 해수온도에 따른 복수기 압력 및 출력곡선(한빛원자력)



붙임 2. 한빛 1발전소 및 각 발전소 복수기 설계사항 비교

변수	한빛1호기	한빛3호기	한빛5호기	고리4호기
형식	단일압력, 3shell	단일압력, 3shell	단일압력, 3shell	단일압력, 3shell
열제거용량 (btu/hr)	6.1163×10^9	6.239×10^9	6.268×10^9	6.1131×10^9
배기증기유량 (lb/hr)	6,078,210	6,554,671	8,022,742	6,261,703
튜브 표면적(ft ²)	1,029,250	1,100,000	971,271	971,500
튜브재질	티타늄	티타늄	티타늄	티타늄
튜브직경 (inch)	1	7/8	1	1
튜브수(개)	65,526	80,034	61,833	61,848
복수기압력 (mmHgA)	38.1	38.1	38.1	38.1
총괄 열전단계수 (btu/hr · ft ² · °F)	420.72	440.6		481.82
저압터빈 배기온도(°C)	33.16	33.16	33.16	33.16
중단온도차(배기 -해수출구)(°C)	4.44	3.88	4.28	4.23
튜브내 냉각수 속도(ft/s)	6.0	6.0	7.62	7.0
해수유량 (gpm, 6대)	858,000	788,484	1,027,860	944,500
해수입구온도(°C)	20.5	20.5	21.94	21.74
해수출구온도(°C)	28.72	29.28	28.88	28.93
대수적 평균온도차(°C)	7.844	7.15	7.20	7.256
불응축 가스유량(lb/hr)	337.5			337.5
튜브청결도(%)	85	85	85	85

붙임 3. 원자력 발전소 랭킨 사이클 및 **Mollier** 선도(1/2)



붙임 3. 원자력 발전소 랭킨 사이클 및 Mollier 선도(2/2)

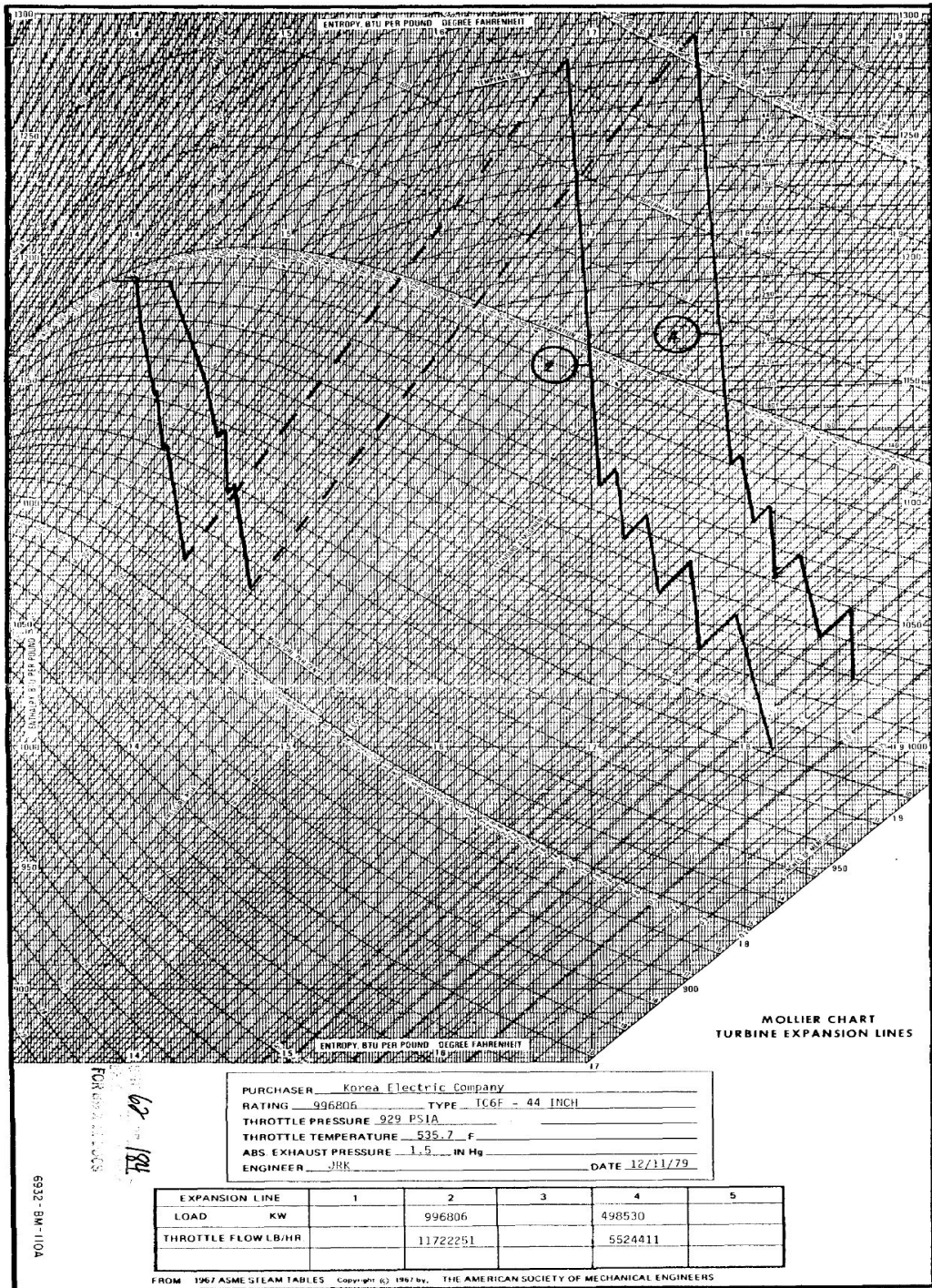


Figure 3-8. Turbine Expansion Lines for Maximum Rated Load, and 50 Percent of Maximum Rated Load (A-E52-1145)

붙임 4. 복수기 열전달 상관식

- HEI(heat exchange institute)로부터 복수기의 전열계수(U) 계산

$$U = C \cdot \sqrt{V} \cdot F_T \cdot F_M \cdot F_C$$

U : 총괄 열전달 계수(BTU/hr · ft² · °F)

C : 튜브 직경 상수

V : 튜브내 순환수 평균속도(ft/sec)

F_T : 순환수 입구온도 보정계수

F_M : 재질 보정계수

F_C : 튜브 청정계수

- 2차계통수의 열방출율 : $Q_{SW} = m_{sw} \cdot [h_e - h_i]$

Q_{SW} : 2차계통수로부터 제거되는 열전달율(BTU/hr)

m_{sw} : 복수기에서 2차 계통수의 질량 유동율(lbm/hr)

h_e : 복수기 튜브지역을 나오는 2차 계통수의 비엔탈피(BTU/lbm)

h_i : 복수기 튜브지역으로 들어가는 2차 계통수의 비엔탈피(BTU/lbm)

- 상변화가 없는 복수기를 통한 열전달율 : $Q_{cw} = m_{cw} \cdot c_p \cdot [T_H - T_C]$

Q_{cw} : 순환수로 전달되는 열전달율(BTU/hr)

m_{cw} : 복수기내 순환수의 질량 유동율(lbm/hr)

c_p : 순환수위 비열(BTU/lbm · °F)

T_H : 복수기를 나온 순환수의 온도(°F)

T_C : 복수기로 들어가는 순환수의 온도(°F)

- 복수기 튜브를 통한 열전달율

$$Q_{COND} = U \cdot A \cdot [T_{SW} - T_{AVG}] = U \cdot A \cdot \delta T_M \left(= \frac{T_2 - T_1}{LN \left[\frac{T_{SW} - T_1}{T_{SW} - T_2} \right]} \right)$$

Q_{COND} : 복수기의 튜브를 통한 열전달율(BTU/hr)

U : 총괄 열전달 계수(BTU/hr · ft² · °F)

A : 총열전달 면적(ft²)

T_{SW} : 저압터빈 출구 증기온도(°F)

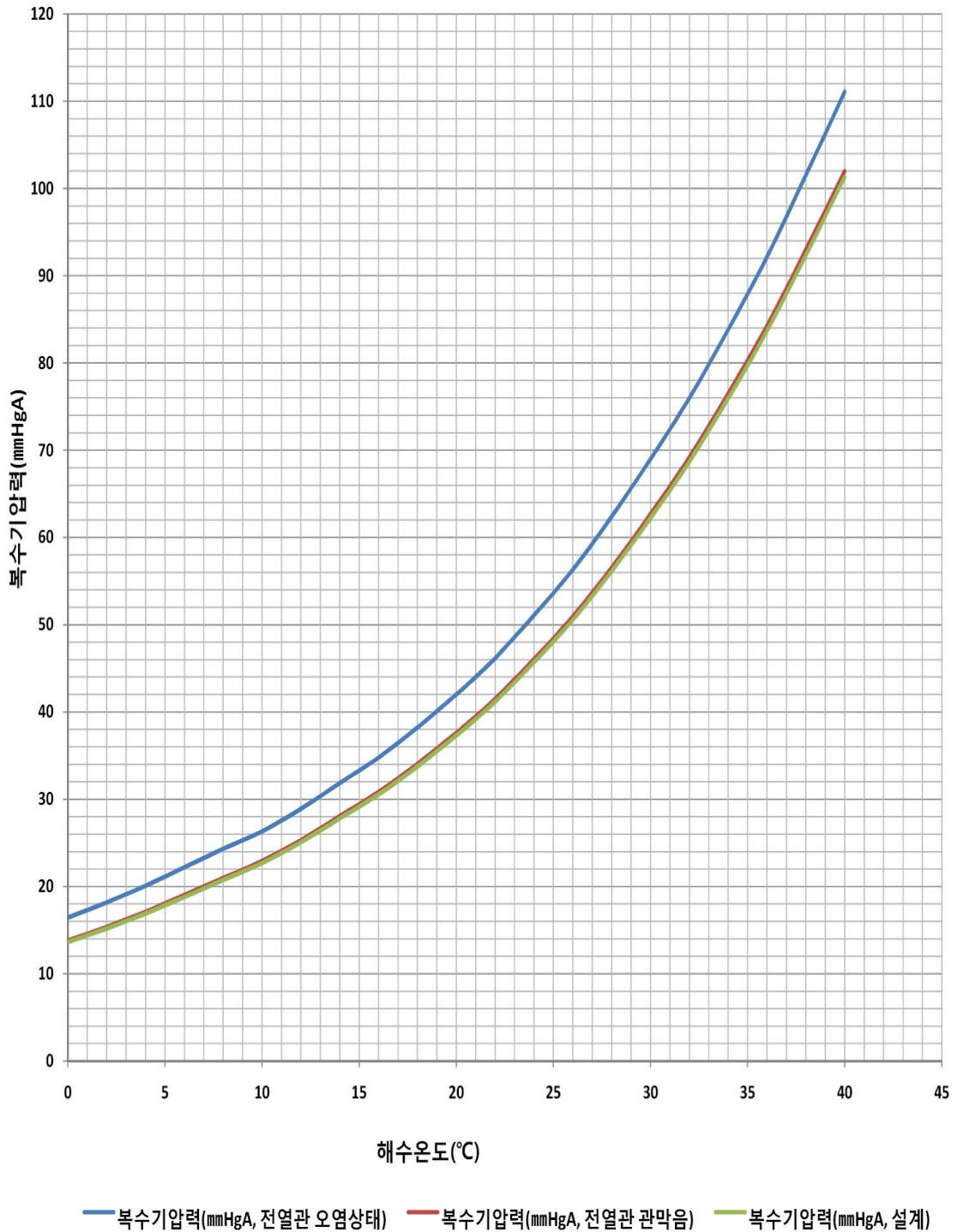
T_{AVG} : 순환수의 입구와 출구의 평균온도(°F)

δT_M : 대수적 평균온도차(°F)

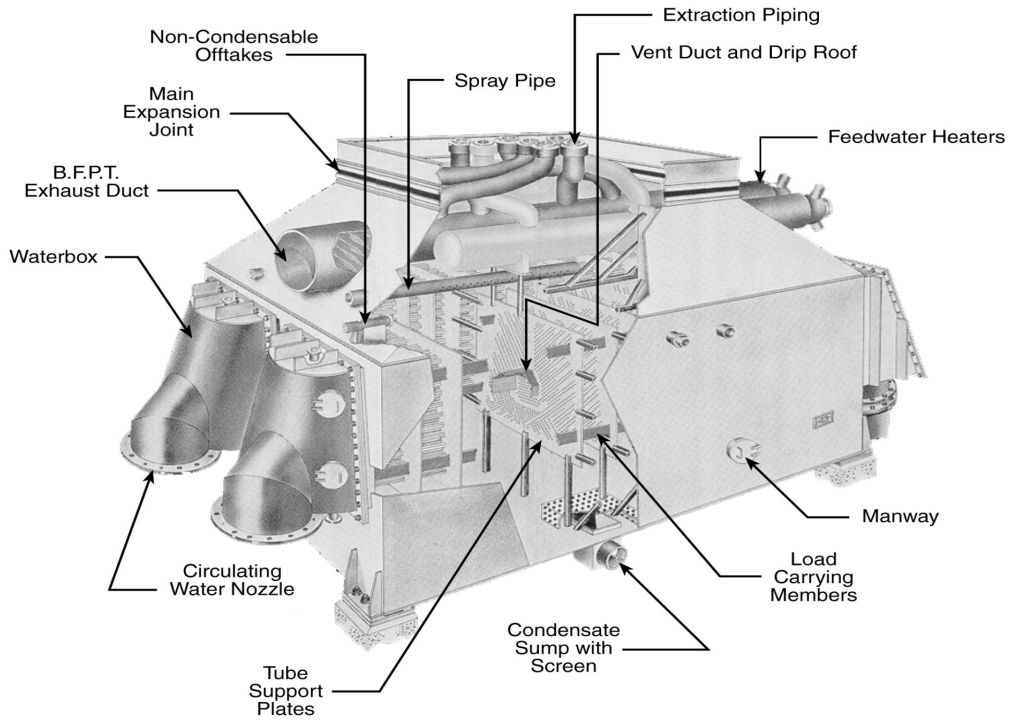
붙임 5. 순환수 온도에 따른 복수기 압력(1/2)

변수계산값 해수입구온도		총괄 열전달 계수	복수기출구 순환수온도	순환수 평균온도	저압터빈 출구 증기온도		복수기 압력 (mmHgA)
					TSW(°F)	TSW(°C)	
°C	°F	Ubtu/hrft ² °F)	Th(°F)	Tavg(°F)	TSW(°F)	TSW(°C)	(mmHgA)
0	32.00	300.3154	46.810	40.20505	60.790	15.994	13.6219
2	35.60	308.5515	50.410	43.80505	63.841	17.689	15.1744
4	39.20	316.7626	54.010	47.40505	66.921	19.401	16.8927
6	42.80	324.9489	57.610	51.00505	70.030	21.128	18.7918
8	46.40	337.182	61.210	54.60505	72.939	22.744	20.7412
10	50.00	355.4281	64.810	58.20505	75.598	24.221	22.6724
12	53.60	367.5238	68.410	61.80505	78.626	25.903	25.0586
14	57.20	377.562	72.010	65.40505	81.778	27.655	27.7837
16	60.80	393.5452	75.610	69.00505	84.713	29.285	30.5404
18	64.40	405.4701	79.210	72.60505	87.852	31.029	33.7428
20	68.00	417.3418	82.810	76.20505	91.018	32.788	37.2815
20.5	68.90	420.6958	83.710	77.10505	91.800	33.222	38.2011
22	71.60	429.1607	86.410	79.80505	94.210	34.561	41.1658
24	75.20	435.0504	90.010	83.40505	97.615	36.453	45.6882
26	78.80	442.8831	93.610	87.00505	100.964	38.313	50.5452
28	82.40	445.6191	97.210	90.60505	104.478	40.265	56.1168
30	86.00	448.7424	100.810	94.20505	107.981	42.212	62.1943
32	89.60	454.5887	104.410	97.80505	111.404	44.113	68.6647
34	93.20	457.3126	108.010	101.4051	114.923	46.068	75.9204
36	96.80	462.3638	111.610	105.0051	118.375	47.986	83.6651
38	100.40	464.3039	115.210	108.6051	121.920	49.955	92.3165
40	104.00	472.0504	118.810	112.2051	125.301	51.834	101.291

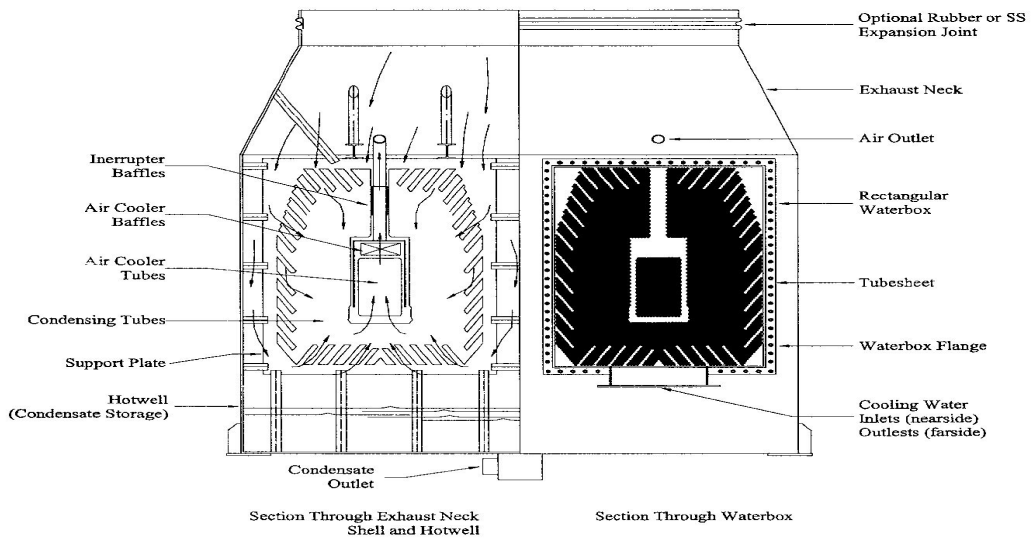
붙임 5. 순환수 온도에 따른 복수기 압력(2/2)



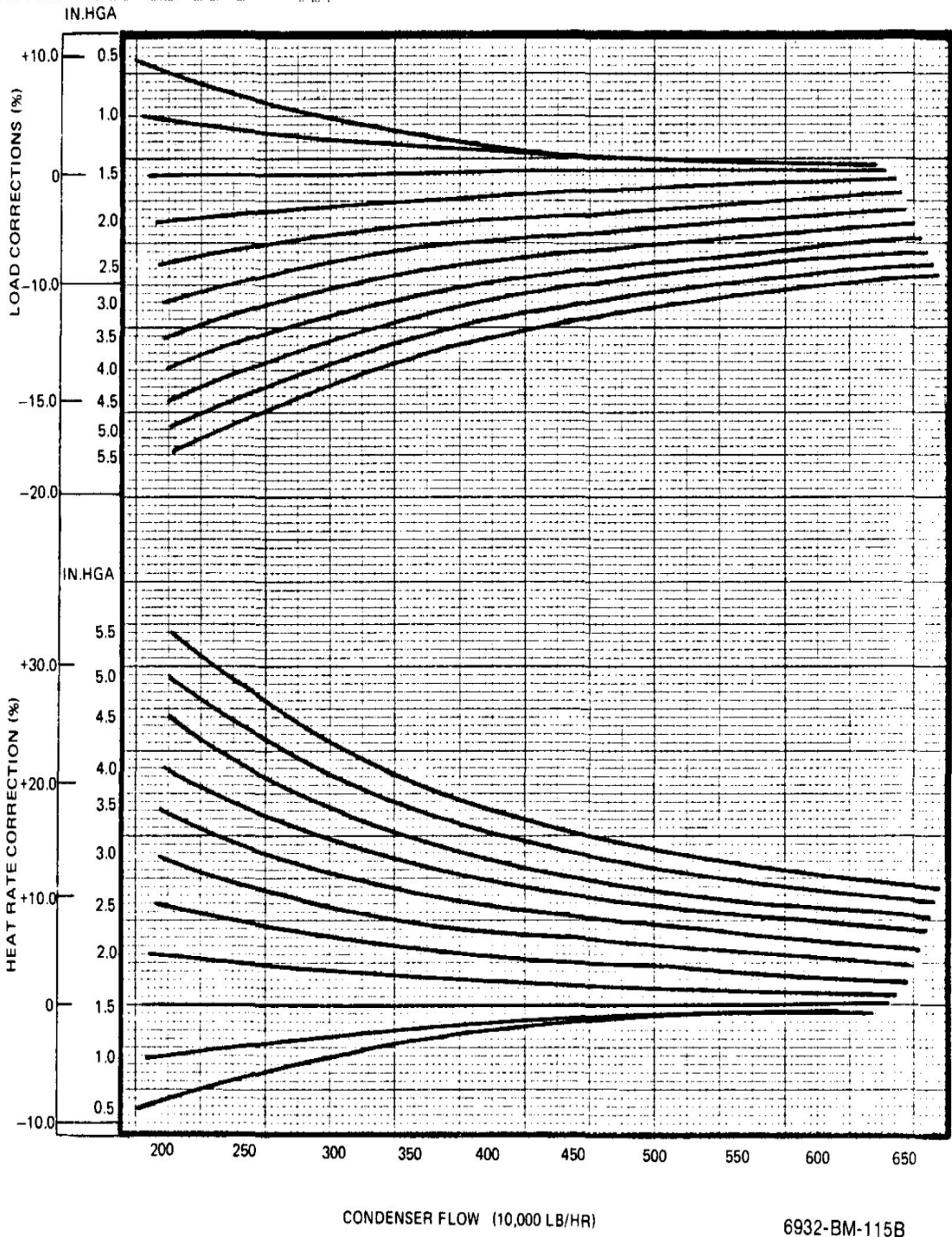
붙임 6. 복수기 구조도



**Downflow Surface Condenser
Single Pass, Divided Waterboxes
(CW Nozzles at Bottom)**



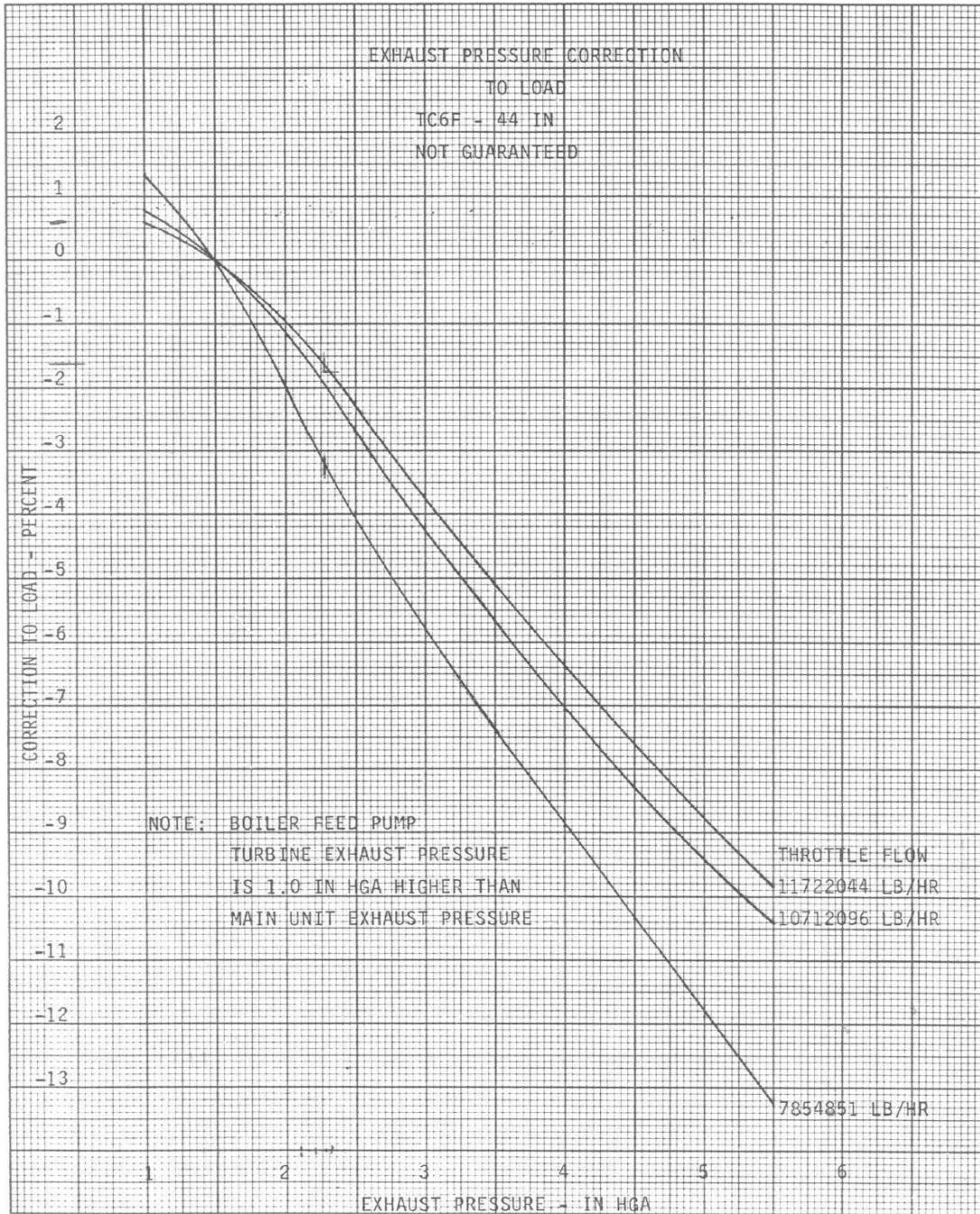
붙임 7. 한빛 1발전소 저압터빈 배기압력에 따른 출력보정곡선(1/3)



붙임 7. 한빛 1발전소 저압터빈 배기압력에 따른 출력보정곡선(2/3)

WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION

CURVE NO. AV776-7390



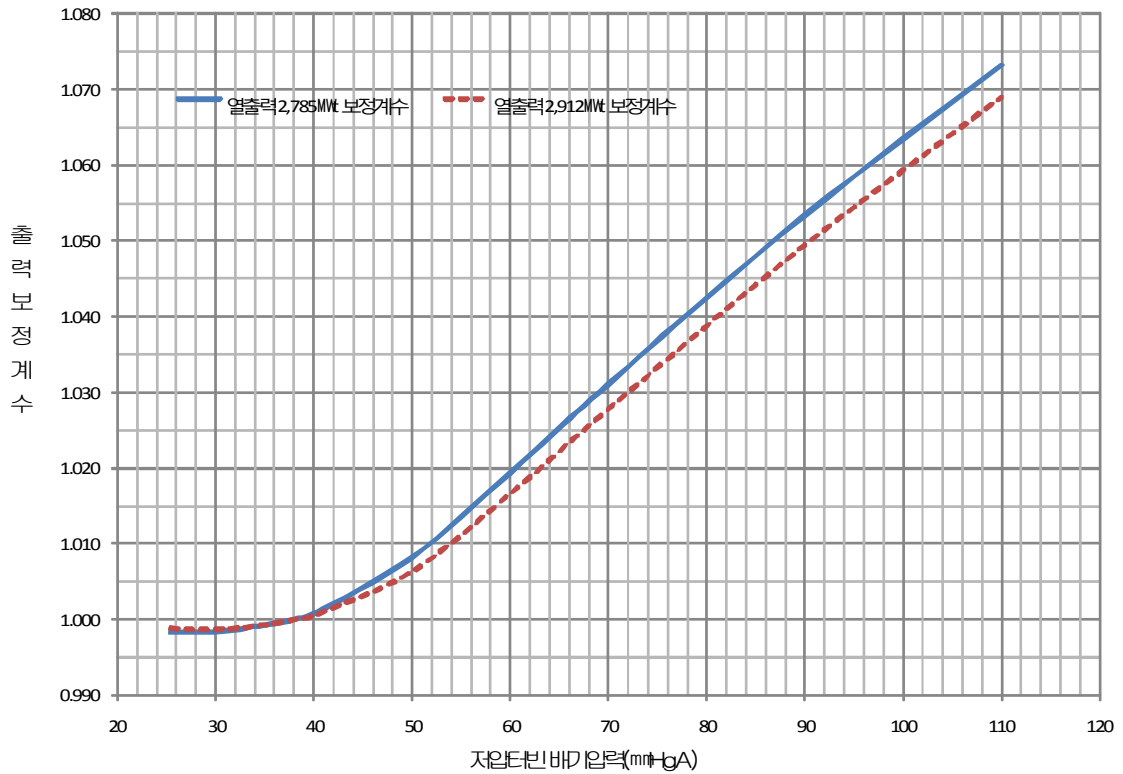
SIGNATURE CJK

DATE 2-26-86

CURVE NO. AV776-7390

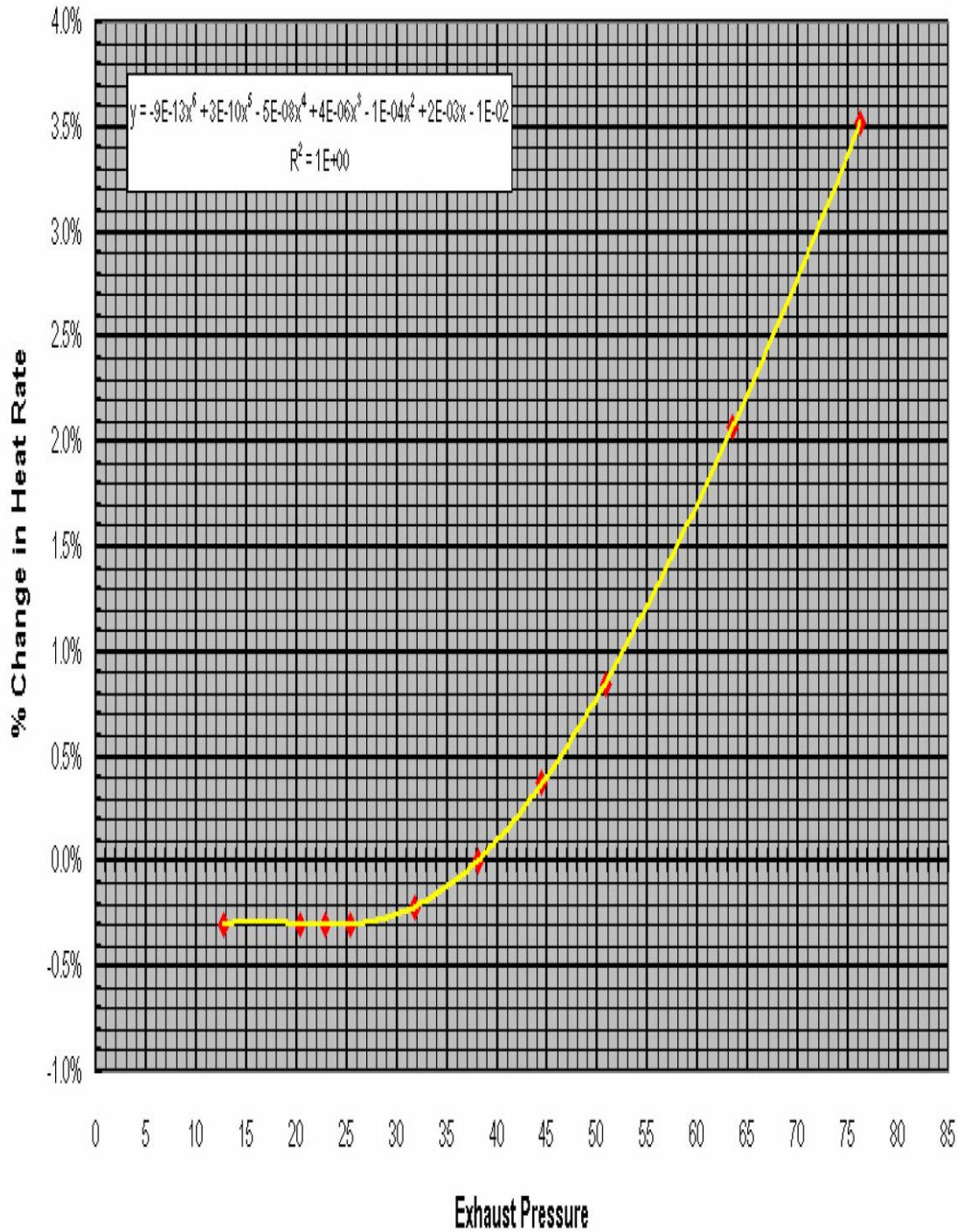
68

붙임 7. 한빛 1발전소 저압터빈 배기압력에 따른 출력보정곡선(3/3)



저압터빈 배기압력(mmHgA)	열출력 2,785 MWt 보정계수	열출력 2,912 MWt 보정계수
25.4	0.99820	0.99877
30.0	0.99828	0.99863
35.0	0.99916	0.99924
38.1	1.00000	1.00000
40.0	1.00062	1.00050
50.0	1.00809	1.00626
60.0	1.01925	1.01653
70.0	1.03100	1.02771
90.0	1.05333	1.04936
110.0	1.07312	1.06881

붙임 8. 한빛 2,3발전소 저압터빈 배기압력에 따른 출력보정곡선



참고문헌

- [1] KOREA NUCLEAR UNITS 7&8 STATION MANUAL(운전 기술 설명서 : 계통 기능 및 설계기준)
- [2] O&M Manual(순환수펌프 : 13081-M-008-59)
- [3] O&M Manual(복수기 사양 : 13081-M-004)
- [4] 한빛 1발전소 기자재 설계집(순환수계통 및 복수계통)
- [5] 한빛원자력본부 교육훈련센터 교재(계통 설명서)
- [6] 한빛 1발전소 발전실무편람
- [7] 한빛 1발전소 계통 운전절차서(순환수계통 및 복수계통)
- [8] 한빛 2,3발전소 계통 운전절차서(순환수계통 및 복수계통)
- [9] 고리 2발전소 계통 운전절차서(순환수계통 및 복수계통)
- [10] Condenser Application and Maintenance Guide, EPRI, Palo Alto, CA:2001.1003088
- [11] 순환수 펌프 성능곡선(13081-M-008-33-1)
- [12] 영원일발-발운-13(계절별 순환수펌프 운전기준)
- [13] 한빛 1발전소 순환수펌프 최적운전시점 기술검토보고서(2015. 06)
- [14] 한빛 1발전소 하절기 복수기 진공도 최적운영을 통한 이용률 향상으로 전력판매 수익 증대 기술검토보고서(2011. 06)
- [15] 열역학(성안당, 2015. 01)

감사의 글

먼저 회사와 학교, 두 마리의 토끼를 놓치지 않으려고 무던히도 발버둥 쳤던 지난 대학원 생활의 제 모습과 그 모습에 지지와 격려를 아끼지 않으셨던 회사 동료들께 진심으로 감사의 말씀을 전해드리고 싶습니다.

이제 정말 졸업이 얼마 안 남았는데 논문을 마무리하면서 감사의 글을 쓰려고 하니 설레임과 아쉬움이 가슴에 가득히 차오릅니다.

직장과 학업을 병행하는 일이 결코 쉽지만은 않았지만 저에게 애정을 쏟아 주시는 많은 분들의 도움으로 인해 이렇게 무사히 졸업을 할 수 있었습니다. 이 좁은 지면을 통해 일일이 감사의 뜻을 전하지는 못하지만 그 분들의 도움이 아니었다면 힘들었을 것입니다. 모든 과정을 마치고 논문의 마지막을 감사의 글로 남기려고 하니 항상 도움만 받고 베풀지 못한 제 자신이 한없이 부끄러워집니다.

본 논문의 지도와 원자력공학이라는 새로운 학문의 길을 소개해주시고 끝까지 이끌어 주신 학과장 송중순 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀 올립니다.

논문 심사과정과 평소 학교생활을 통하여 변함없는 애정과 관심으로 격려해 주신 이경진 교수님, 나만균 교수님, 김진원 교수님 그리고 밤낮으로 학과 일에 온갖 정열을 바치시셨던 전임 학과장 정운관 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

끝으로, 석사 과정을 무사히 마칠 수 있도록 배려해 주고 늘 곁에서 따뜻하게 도와 준 아내와 세 아이들에게 가득한 존경과 사랑을 드리며 이 작은 결실의 기쁨을 함께 하면서 감사의 마음을 전해 드립니다.

2015년 11월

김 수 남

저작물 이용 허락서					
학 과	원자력공학과	학 번	20147265	과 정	석사
성 명	한글 : 김 수 남		한문 : 金 洙 男	영문 : KIM SOO NAM	
주 소	전남 영광군 홍농읍 홍농로 546, 한수원 사택 119동 802호				
연락처	E-mail : kimsoonam@khnp.co.kr				
논문제목	하절기 복수기 진공도 최적운영을 통한 한빛 1발전소 이용률 향상에 관한 연구				
	A study on the utilization improved over the summer condenser vacuum optimum operating for Hanbit NPP 1				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함. 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음. 7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center;"> 동의여부 : 동의(O) 반대() </p> <p style="text-align: center;">2015년 11월</p> <p style="text-align: right;">저작자 : 김 수 남 (인)</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em; font-weight: bold;">조선대학교 총장 귀하</p>					