



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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](#)

2011년 2월
석사학위논문

표준형 원전 주급수 Venturi
Fouling 현상 및 대책 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 중 화

표준형 원전 주급수 Venturi
Fouling 현상 및 대책 연구

A Study on Feedwater Venturi Fouling and Its Countermeasure

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 중 화

표준형 원전 주급수 Venturi
Fouling 현상 및 대책 연구

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 종 화

박종화의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 부교수 김진원 (인)

위 원 조선대학교 교수 정운관 (인)

위 원 조선대학교 교수 이경진 (인)

2010년 11월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	ii
그림 목차	iii
ABSTRACT	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 Fouling 현상분석(주급수 유량 기반 열출력 측정)	3
제 1 절 주급수유량 기반 원자로 열출력 측정식	3
1. 증기발생기 유량 평형식	3
2. 주급수 질량유량 측정식	5
3. 원자로 열출력 측정식	8
제 2 절 영광 5호기 주기별 주급수 파울링 현상	10
1. 주급수 유량 기반 원자로 열출력 유효성 검토	10
2. 1,2차측 열적 주요운전변수 검토	12
3. 출력 감소 원인 분석	18
제 3 장 열출력 측정방법 개선(주증기 유량 기반 열출력 측정)	19
제 1 절 주증기유량 기반 원자로 열출력 측정식	19
1. 증기발생기 유량 평형식	19
2. 주증기 질량유량 측정식	19
3. 주증기유량 기반 열출력 측정	24
제 2 절 주증기유량 기반 원자로 열출력 알고리즘	26
1. MSBSCAL 적용 COLSS 알고리즘	26
2. 발전소 감시기준 출력 선택	27
제 3 절 영광 3호기 주증기 유량기반 열출력 적용	30
1. 1,2 차측 열적 주요운전변수 검토	30
2. 열출력 검토	33
제 4 장 결론	35
참고문헌	36

표 목 차

표 2.2.1	영광5호기 4주기 이차측 열출력 입증결과	10
표 2.2.2	영광5호기 4주기 RCS 측정 방소 및 설계 방소 농도 차	12
표 2.2.3	영광5호기 4주기 RCS 질량유량 및 ΔH 변화표	13
표 2.2.4	영광5호기 4주기 진행시 전기출력 변화	14
표 2.2.5	주급수 Venturi Fouling 시 증상	18
표 3.3.1	주급수 Venturi Fouling 해소에 따른 증상	34

그림 목차

그림 2.1.1	증기발생기 유출입 유량 및 유량 측정위치 개념도	4
그림 2.1.2	온도에 따른 열팽창 계수의 변화	7
그림 2.2.1	영광 5호기 4주기 FWBSCAL/ BDT/ PHICAL 변화	11
그림 2.2.2	영광 5호기 4주기 FWBSCAL/ RCS 질량유량/ 엔탈피 변화	12
그림 2.2.3	영광 5호기 4주기 2차측 출력(FWBSCAL) 및 전기출력 변화	14
그림 2.2.4	영광 5호기 4주기 2차측 출력(FWBSCAL) 및 정적 1차측 출력 변화	15
그림 2.2.5	영광 5호기 4주기 주급수 및 주증기 유량 변화	16
그림 2.2.6	영광 5호기 4주기 주증기 및 터빈 1단 압력 변화	17
그림 2.2.7	영광 5호기 4주기 2차측 출력(FWBSCAL) 및 주급수 온도 변화	17
그림 3.1.1	주증기 압력 결정	21
그림 3.2.1	COLSS 열출력 계산모델 개념	28
그림 3.2.2	MSBSCAL 열출력 계산 흐름도	29
그림 3.3.1	영광 4호기 12주기 2차측 출력(MSBSCAL) 및 전기출력 변화	30
그림 3.3.2	영광 4호기 12주기 2차측 출력(MSBSCAL) 및 정적 1차측 출력 변화	31
그림 3.3.3	영광 4호기 12주기 주급수 및 주증기 유량 변화	32
그림 3.3.4	영광 4호기 12주기 주증기 및 터빈 1단 압력 변화	32
그림 3.3.5	영광 4호기 12주기 2차측 출력(MSBSCAL) 및 주급수 온도 변화	33

ABSTRACT

A Study on Feedwater venturi Fouling and Its Countermeasure

By Park, Chong Hwa

Adviser : Prof. Lee, Goung Jin

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

This study described the feedwater flow-based reactor thermal power(FWBSCAL) thermal power calculation methodology as well as nuclear power plants' main phenomena that the calculated reactor thermal power is evaluated smaller than the real case due to fouling of foreign materials in feedwater flow venturi when an existing thermal power calculation methodology, FWBSCAL is used in Korean standard nuclear power plants as operating time passes during operation. In addition, it explained the main stream flow-based thermal power(MSBSCAL) methodology as a new reactor thermal power calculation method to solve problems of FWBSCAL.

It also established the measurement formula of main steam flow mass to calculate thermal power by using main stream flow instead of feedwater flow and the empirical formula for determining input factors of the measurement formula, and described conservatism of a new methodology.

This study lastly described main phenomena of nuclear power plants to solve feedwater flow venturi fouling of Koran standard nuclear power plants according to the introduction of MSBSCAL.

제 1 장 서 론

국내의 표준형 원자력발전소(OPR 1000)의 노심운전제한치감시계통(Core Operating Limit Supervisory System, COLSS)은 인허가 출력 (Licensed Power, LP) 감시를 위하여 증기발생기 주급수유량을 측정하고, 이를 입력으로 하여 증기발생기 이차측을 제어체적으로 하는 열평형 방법에 의하여 원자로열출력(이차측 열출력, Secondary Calorimetric Power, 코드 변수명 BSCAL)을 측정 및 계산한다. 그런데 최근 가동 중인 일부 발전소에서 BSCAL 열출력 계산에 입력되어 이용되는 주급수유량을 측정하는 주급수 벤츄리에서 이물질 침착 (fouling) 원인으로 인하여 주급수유량이 과대 측정되는 사례가 있었다. 이로 인하여 COLSS에서 계산되는 BSCAL이 과대평가되어 지시되므로 BSCAL을 인허가 출력 이하로 유지하기 위하여 원자로열출력을 감소시키기 때문에, 실제로 전기 출력이 감소하는 결과를 가져온다. 이물질 침착 현상이 운전 중 해소(defouling)될 경우에는 반대로 실제 출력이 증가할 수 있다. 주급수 벤츄리에서의 이상 현상은 국내외의 대부분의 원자력 발전소에서 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 운전중 원자로출력의 실제적인 변동을 야기하여 원전의 경제성뿐만 아니라 안전성 면에서도 어려움을 가져오고 있다. 이와같은 사례로 주급수유량 기반 열출력을 기준출력으로 이용하고 있는 영광 5호기의 주급수 벤츄리 파울링 현상에 따른 주요 운전변수를 분석하였다. 주급수 벤츄리 파울링 현상을 방지하기 위한 주급수 벤츄리의 측정 유량을 기반으로 하는 기존의 이차측 열출력 (FWBSCAL)과는 독립적이고 다양성을 갖춘 계산 방법론 적용이 요구되고 있다.

주급수유량이 과대 측정되는 것으로 평가된 시기의 증기발생기 증기노즐의 측정차압을 이용하여 관찰한 주증기유량의 변화 추이는 실제 발전소의 출력 (터빈 또는 전기 출력)의 변화 추이와 매우 유사하게 나타나고 있다. 즉, 주증기유량은 실제 증기발생기로부터 터빈으로 공급되는 증기유량을 잘 나타내고 있는 것이다. 이러한 주증기유량의 측정 특성을 이용하여 주급수 벤츄리의 이물질 침착 현상의 영향을 거의 받지 않는 이차측 열출력 측정 방법론을 적용함으로써 주급수 벤츄리의 이물질 침착 또는 이탈로 인한 노심출력의 변동을 방지하고, 신뢰도 높고 효율적인 노심관리에 적절한 원자로열출력 계산방법이 요구되고 있다.

주증기유량 기반 열출력(MSBSCAL)은 기존의 열출력 계산 방법론에서 측정 주급수유량 (Measured Feedwater Flow) 대신에 측정 주증기유량 (Measured Main Steam

Flow)을 이용하는 방법으로서, 이미 해외의 다수의 발전소에서 도입하여 운전하고 있다. 이러한 해외의 방법론에 대한 직접적인 기술 도입의 경우에는 관련 기술에 대한 해외 의존도가 심화되고, 관련 알고리즘 개선의 어려움, 유지 및 보수비용 증가 등의 많은 문제점이 있다.

따라서 측정 주증기유량을 이용한 원자로열출력 계산 방법론 개발은 국내의 기술을 활용하여 확보할 수 있으므로, 관련 기술의 국내 개발 및 적용은 국내 원전산업의 경쟁력을 제고하는 성과가 될 것이다.

본 연구는 주증기유량을 이용한 원자로 열출력 계산 방법론인 MSBSCAL 열출력 계산 방법론을 국내 표준형 원자력발전소의 COLSS 열출력 계산 모듈에 추가하여, 발전소 감시 기준출력으로 이용할 수 있음을 입증하기 위하여 관련 방법론에 이용되는 주증기 질량유량 측정식, 이를 이용한 열출력 측정식 그리고 MSBSCAL 열출력 도입에 따른 영광 4호기 주급수 벤츄리 파울링 해소와 관련된 1,2차측 열적 주요 운전변수를 분석하였다.

제 2 장 Fouling 현상분석(주급수 유량기반 열출력 측정)

제 1 절 주급수유량 기반 원자로 열출력 측정식

1. 증기발생기 유량 평형식

국내 표준형 원자력발전소의 증기발생기는 그림 2.1.1에 나타나 있는 바와 같이 크게 주급수유량, 주증기유량 그리고 취출수유량의 3개의 유로로 구성되어 있다. 주증기유량의 경우에는 각 증기발생기 별로 2개의 증기노즐이 부착되어 있다. 주급수 유량과 주증기유량은 측정장치가 설치되어 있다. 그러나 취출수유량의 경우는 별도의 측정장치가 없으며 미리 설정된 설계유량이 흐를 수 있도록 제작되어 설치되어 있으며, 취출수유량이 필요할 경우 설계값을 사용하고 있다. 정상상태의 평형상태에서는 증기발생기를 제어체적으로 하는 유량 평형식은 다음과 같다.

$$W_{FW} = W_{MS} + W_{BD} \quad (2.1)$$

W_{FW} = 증기발생기로 공급되는 주급수유량

W_{MS} = 증기발생기를 떠나는 주증기유량 (2개의 증기노즐 유량의 합)

W_{BD} = 증기발생기를 떠나는 취출수유량

위식에 의하면 3개의 변수중 2개를 알면 나머지 하나의 변수를 계산할 수 있다. 현재의 FWBSCAL 방법론에서는 주급수유량 (측정)과 취출수유량 (설계값 이용)을 이용하고, 주증기유량은 이 2개의 유량으로부터 계산한 값을 열출력 측정식에 이용하는 방법이다. 따라서 현재 방법론에서 이용하고 있는 유량 평형식은 다음과 같다.

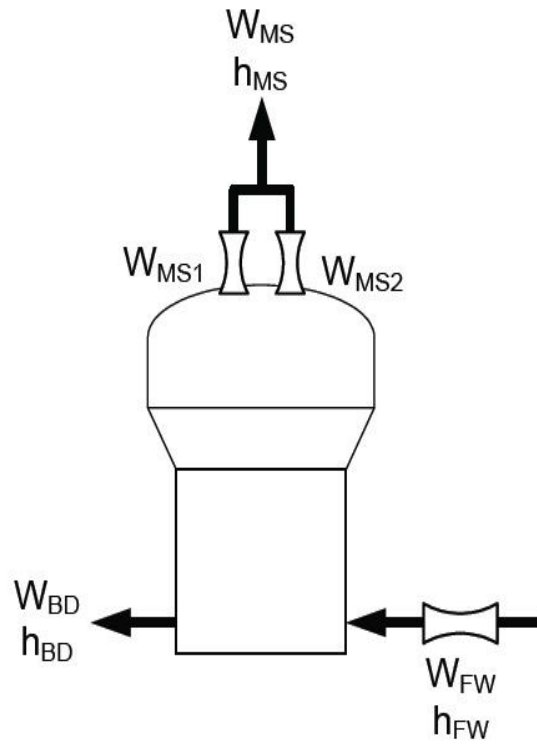
$$W_{MSC} = W_{FWM} - W_{BD} \quad (2.2)$$

W_{MSC} = 증기발생기를 떠나는 주증기유량 (유량 평형식에 의한 계산값)

W_{FWM} = 증기발생기로 공급되는 주급수유량 (측정값)

W_{BD} = 증기발생기를 떠나는 취출수유량 (설계값)

현재 국내 표준형 원자력발전소의 COLSS 열출력 모듈에 구현된 BSCAL 열출력 계산 방법론은 열출력 측정식의 주증기유량을 측정값 대신에 유량 평형을 이용한 계산값을 이용하는 방법론이다.



 Flow Measuring Device

W_{FW} Feedwater Flow h_{FW} Feedwater Enthalpy

W_{MS} Main Steam Flow h_{MS} Main Steam Enthalpy

W_{BD} Blowdown Flow h_{BD} Blowdown Enthalpy

그림 2.1.1 증기발생기 유출입 유량 및 유량 측정위치 개념도

2. 주급수 질량유량 측정식

증기발생기로 공급되는 주급수유량 측정장치는 벤츄리 형태로서 차압식 유량계이므로 참고문헌 [2-1]에 근거한 다음과 같은 차압식 유량계의 질량유량 측정식을 적용하고 있다.

$$W_{FWM} = k \left[\frac{CYd^2F_a}{\sqrt{1-\beta^4}} \right] \left[\frac{\sqrt{\Delta P_{FW}}}{\sqrt{v_{FW}}} \right] \quad (2.3)$$

- W_{FWM} = 측정 주급수 질량유량
- k = 단위변환 상수
- C = 방출계수 (discharge coefficient)
- Y = 유체 압축계수 (compressibility)
- d = 벤츄리 목 직경 (throat diameter)
- F_a = 유로면적 열팽창 계수 (area expansion factor)
- β = 연결 배관 직경에 대한 벤츄리 목 직경의 비
- ΔP_{FW} = 유량 측정장치 측정차압 (measured differential pressure)
- v_{FW} = 유체의 비체적 (specific volume)

주급수유량의 경우 과냉각 상태이므로 유체 압축계수 (Y)는 1의 값을 적용하고 있다. 따라서 현재의 FWBSCAL 방법론에서의 주급수 질량유량 측정식은 다음과 같다.

$$W_{FWM} = k \left[\frac{Cd^2F_a}{\sqrt{1-\beta^4}} \right] \left[\frac{\sqrt{\Delta P_{FW}}}{\sqrt{v_{FW}}} \right] \quad (2.4)$$

2.1 방출계수

주급수 질량유량 측정식에 포함된 방출계수의 값은 주급수유량 측정장치인 벤츄리의 제작자가 제공된 값을 입력으로 사용한다.

2.2 질량유량 측정식에 필요한 유체압력

주급수 질량유량 측정식에 포함된 유체의 비체적을 구하기 위하여 필요한 주급수 압력은 주증기헤더 부위에서 측정된 압력으로부터 다음의 식으로 계산된 값을 이용한다.

$$FWP = PSEC + a + b \cdot \Delta P_s \quad (2.5)$$

FWP = 주급수 압력

PSEC = 주증기헤더 측정압력

ΔP_s = 주증기유량 측정차압 (2개의 노즐중 미리 선택된 노즐의 측정차압)

a, b = 출력 상승시험시 결정되는 값 (상수)

위의 식으로 계산되는 압력은 주증기 헤더 위치에서 측정된 증기압력에 주급수유량 측정 위치까지의 압력강하를 주증기유량의 함수로 고려하여 더한 형태이다.

2.3 유로면적열팽창계수유로면적열팽창계수

유량 측정장치의 재질과 관련이 있다. 대부분의 금속 재질은 온도의 증감에 따라 팽창하거나 수축하는 특성이 있다. 유량 측정장치의 직경은 보통 상온(68°F)에서 측정되지만, 실제 사용되는 온도는 유체의 온도와 같다고 볼 수 있다. 이와 같이 측정장치의 온도 변화에 따른 유로면적의 변화를 고려한 것이 면적 열팽창계수이다. 그림 2.1.2에 제시된 몇 가지 재질에 대한 면적 열팽창계수의 변화가 나타나 있다.

주급수온도 변화에 따른 주급수유량 벤츄리의 유로면적 변화를 동적으로 고려하기 위하여 참고문헌 [2-1]에 근거하여 주급수온도의 일차함수로 근사된 식을 적용하고 있다.

$$F_a = c + d \cdot (FWT) \quad (2.6)$$

F_a = 면적 열팽창 계수

FWT = 주급수온도

c, d = 상수

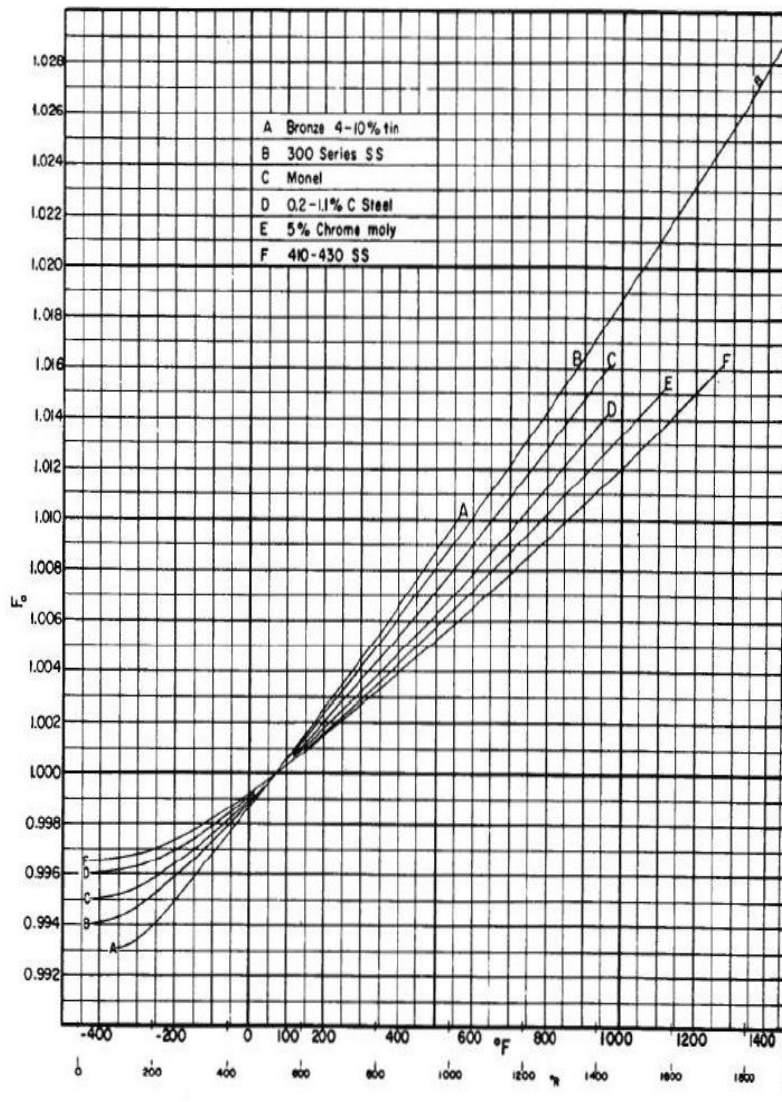


그림 2.1.2 온도에 따른 열팽창 계수의 변화

3. 원자로 열출력 측정식

기존의 FWBSCAL 방법론에서는 주급수유량은 측정된 값을 이용하고 주증기유량은 식(2.2)의 유량 평형식을 이용하여 계산된 값을 이용한다. 따라서 FWBSCAL 방법론에서 증기발생기를 제어체적으로 한 열평형식은 다음과 같다.

$$Q_{FW} = W_{MSC} * h_{MS} + W_{BD} * h_{BD} - W_{FWM} * h_{FW} \quad (2.7)$$

- Q_{FW} = FWBSCAL 증기발생기 열출력
- h_{MS} = 증기발생기를 떠나는 주증기 엔탈피
- h_{FW} = 증기발생기로 공급되는 주급수 엔탈피
- h_{BD} = 증기발생기를 떠나는 취출수 엔탈피

열평형식에 포함된 주증기 엔탈피를 결정하기 위하여 필요한 증기압력은 주급수압력을 결정하는 식 (2.5)와는 상수값을 제외하고는 동일한 형태의 다음의 식을 적용한다.

$$PSG = PSEC + p + q \cdot \Delta P_s \quad (2.8)$$

- PSG = 증기압력
- $PSEC$ = 주증기헤더 측정압력
- ΔP_s = 주증기유량 측정차압 (2개의 노즐중 미리 선택된 노즐의 측정차압)
- p, q = 출력 상승시험시 결정되는 값 (상수)

식 (2.7)의 열평형식을 측정되거나 상수의 입력변수로 구성된 식으로 표현하면 다음과 같이 측정 주급수유량 및 취출수유량으로 구성된 식으로 변환된다.

$$Q_{FW} = W_{FWM}(h_{MS} - h_{FW}) - W_{BD}(h_{MS} - h_{BD}) \quad (2.9)$$

최종적으로 FWBSCAL 열출력은 2대의 증기발생기 열출력의 합에 계통으로의 에너지 입력 (EC) 및 손실 (EL)을 고려하여 다음과 같이 결정된다.

$$FWBSCAL = Q_{FW1} + Q_{FW2} + EL - EC \quad (2.10)$$

Q_{FW1} = 증기발생기 1의 열출력 (식 2.9 이용)

Q_{FW2} = 증기발생기 2의 열출력 (식 2.9 이용)

EL = 제어체적으로부터의 에너지 손실 (energy loss)

EC = 제어체적으로의 에너지 입력 (energy credit)

제 2 절 영광 5호기 주급수 파울링 현상

1. 주급수 유량 기반 원자로 열출력 유효성 검토

영광 5호기 4주기 정상운전 중 전기출력이 주기초 대비 약 10Mwe 정도 감소되어 이에 따른 발전소 출력(Φ_{cal} , BDT, BSCAL등)을 검토하여 원자로 열출력 유효성 확인하였다.

1.1 이차측 열출력(FWBSCAL) 유효성 검토

발전소 운전 중 기준이 되는 출력으로 COLSS 내에서 계산이 잘못되거나 시운전 중 취득된 상수/4주기 설계 자료 입력이 잘못될 경우 발전기 출력이 낮게 생산 될 수 있으므로 이런 가능성을 점검하였다.

COLSS에서 계산되는 BSCAL을 이차측 열평형방법에 의해 계산된 이차측 열출력과 비교하여 정확성을 검증하여 결과는 아래와 같다.

표 2.2.1 영광5호기 4주기 이차측 열출력 입증결과

BSCAL ⁽¹⁾	이차측 열출력 ⁽²⁾	판정기준	시험결과(%)
99.94	99.76	(1) - (2) $\leq \pm 0.2\%$	0.18

※ 사용코드 : CALMET(설계자 제공)

COLSS database를 BSCAL 계산에 사용되는 가변상수를 설계값과 비교하여 확인결과 COLSS에 입력되어 있는 DATA BASE는 유효하며 COLSS에서 계산되는 BSCAL의 계산 알고리즘은 정확하게 계산되고 있는 것으로 평가되었다.

1.2 일차측 출력 유효성 검토

CPC나 COLSS에서 지시하고 있는 1차측 출력이 높게 지시될 경우 발전기 출력이 낮게 생산 될 수 있으므로 이런 가능성을 점검하였다.

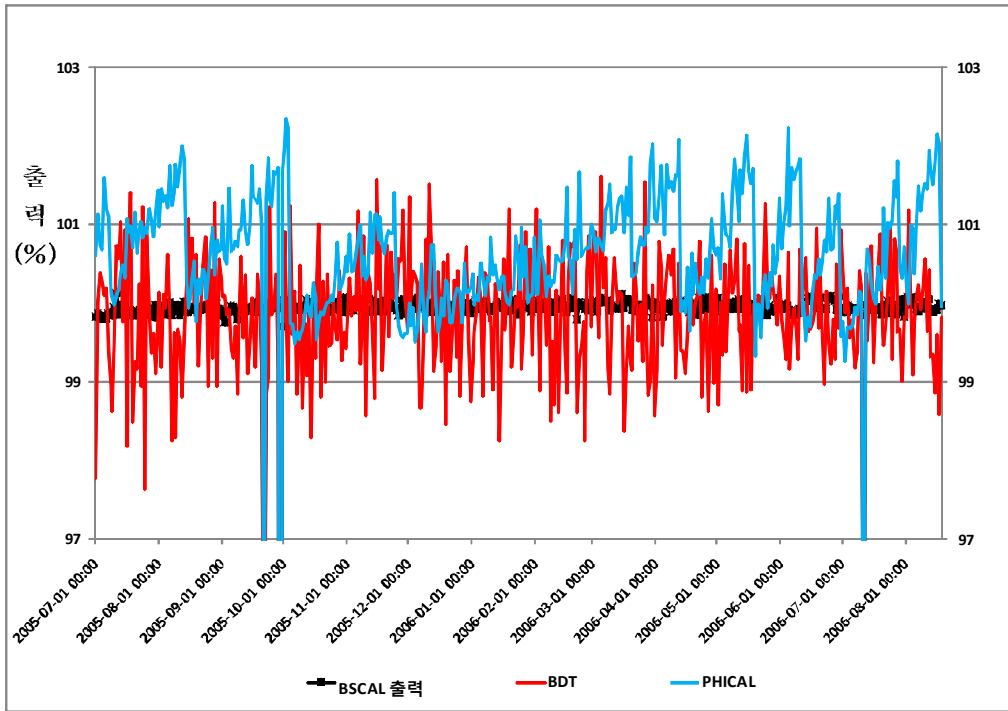


그림 2.2.1 영광5호기 4주기 FWBSCAL/ BDT/ PHICAL 변화

BDT 및 PHICAL은 CPC의 safety limit인 LPD, DNBR 계산에 사용되는 출력으로 운전 중 동일출력에서도 유량상수, 제어봉삽입 상태 및 저온관온도 변화에 다르게 계산됨에 따라 교정상수(TPC, KCAL)를 이용하여 발전소 기준출력인 BSCAL에 교정되며, 발전소 기준출력보다 작게 지시되지 않도록 계산되기 때문에 실제 노심출력을 정확히 묘사하지 못한다.

BDT 및 PHICAL은 BSCAL 출력을 기준하여 필요시 교정되는 출력으로써 절대출력으로 사용이 불가하고 따라서 전기출력 감소 원인 분석 사용에는 부적절하다.

1.3 원자로 냉각재 붕소 농도 유효성 검토

정상 출력이하로 운전하는 상태가 장기적으로 지속될 경우 임계 붕소농도는 설계 예측값 보다 높게 유지될 가능성이 있어 이를 점검하였다.

표 2.2.2 영광5호기 4주기 RCS 측정방소농도 및 설계방소농도 차

구 분	방소 농도(ppm)			판정기준	결 과
	측정값	설계값	차이		
06. 7.27	420	413	7	측정값 - 설계값 ≤ ±1000 pcm (≒117 ppm)	만족
06. 8.24	328	320	8		만족

노심외 반응도를 고온 전출력(HFP) 및 제어군 완전인출(ARO)시 현재 임계방소농도와 핵설계보고서(NDR)상의 설계방소농도를 비교한 결과 운영기술지침서의 제한치를 만족하고 있음을 알 수 있다.

2. 1.2 차측 열적 주요 운전변수 검토

2.1 일차측 엔탈피 변화량 유효성 검토

COLSS BSCAL이 주기 중 거의 일정하게 유지되는 상태에서 RCS 질량유량은 주기초와 비교할 때 약 2.5% 정도 증가하였으며, 측정 ΔH 는 감소추세를 나타내고 있다.

BSCAL Vs 질량유량 및 엔탈피 변화

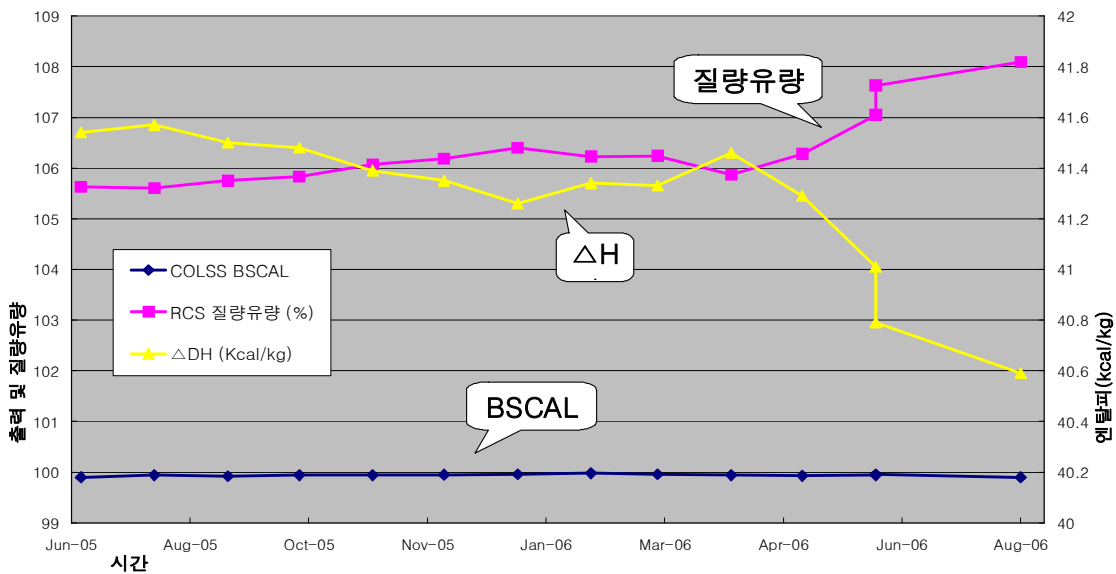


그림 2.2.2 영광5호기 4주기 FWBSCAL/ RCS 질량유량/ 엔탈피 변화

$$\text{RCS 질량유량} = \text{COLSS BSCAL} / \Delta\text{H}(\text{고온관/저온관 엔탈피 차})$$

측정된 ΔH 값과 주기초에 측정된 값과의 차를 출력으로 환산한 결과 현재의 일차측 출력이 주기초 값 보다도 2% 정도 작게 평가 되었다.

$$\begin{aligned} \text{엔탈피 기준 출력 감소량} &= (\text{주기초 } \Delta\text{H} - \text{최근 측정 } \Delta\text{H}) * \text{COLSS BSCAL} / \Delta\text{H} \\ &= (41.54 - 40.60)\text{kcal/kg} * 99.9\% / 41.54 \text{ kcal/kg} = 2.26\% \end{aligned}$$

표 2.2.3 영광5호기 4주기 RCS 질량유량 및 ΔH 변화표

구 분	COLSS BSCAL	RCS 질량 유량(%)	Tc평균	Th평균	ΔH (Kcal/kg)	$\Delta\text{H}/\text{BSCAL}$ (Kcal/kg/%)
'05. 7.26	99.90	105.63	295.88	325.70	41.54	0.4158
'05. 8.23	99.94	105.60	295.84	355.74	41.57	0.4159
'05. 9.22	99.92	105.75	295.83	325.63	41.50	0.4153
'05.10.20	99.94	105.83	295.88	325.66	41.48	0.4150
'05.11.02	99.94	106.07	295.81	325.53	41.39	0.4141
'05.12.14	99.95	106.18	295.70	325.43	41.35	0.4143
'06. 1.11	99.96	106.40	295.69	325.36	41.26	0.4127
'06. 2.09	99.98	106.23	295.67	325.39	41.34	0.4134
'06. 3.09	99.96	106.24	295.88	325.56	41.33	0.4134
'06. 4.06	99.94	105.87	295.96	325.72	41.46	0.4148
'06. 5.04	99.93	106.28	295.75	325.43	41.29	0.4131
'06. 6.01	99.94	107.05	295.68	325.18	41.01	0.4103
'06. 6.28	99.96	107.63	295.53	324.91	40.79	0.4080
'06. 8.09	99.90	108.09	295.62	324.87	40.60	0.4060

2.2 2차측 출력(FWBSCAL) 및 전기출력 변화

주기 중 BSCAL은 거의 일정한 상태가 유지되고 있으나 전기출력 및 터빈출력의 감소 경향이 4주기에서 유사하게 나타나고 있음. 감소율은 주기가 진행될수록 다소 커지는 것으로 보이며 '06. 3월 이후 부터(4주기)는 급격히 감소함을 나타내고 있다.

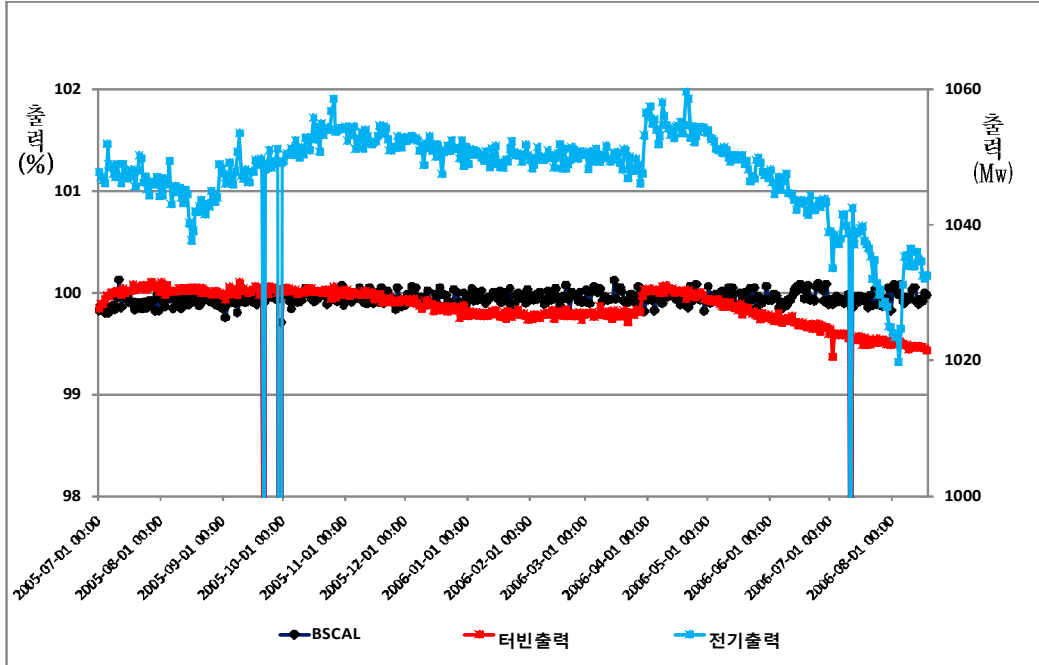


그림 2.2.3 영광5호기 4주기 2차측 출력(FWBSCAL) 및 전기출력 변화

표 2.2.4 영광5호기 4주기 진행시 전기출력 변화

구 분	전기출력	비 고
'05. 6.29	1048 MWe	3차 O/H 후 100% 도달시 전기출력
'06. 4.05	1056 MWe	주기 중 최대 전기출력
'06. 6.29	1040 MWe	중간정비 수행 후 전기출력
'06. 8.18	1022 MWe	주기 중 최저 전기출력
'06. 8.23	1033 MWe	

2.3 2차측 출력(FWBSCAL) 및 정적 1차측 출력 변화

2차측 열출력(BSCAL)이 일정한 상태에서 T_{avg} 및 T_{cold} 가 감소한 것은 2차측 열출력 증가에 의한 1차측 열출력 감소, 즉 출력제한에 의한 것으로 사료된다. 즉, 1차측 열출력이 일정한 상태에서 RCS 온도가 감소하기 위해서는 주증기 유량의 증가가 필수적이다.

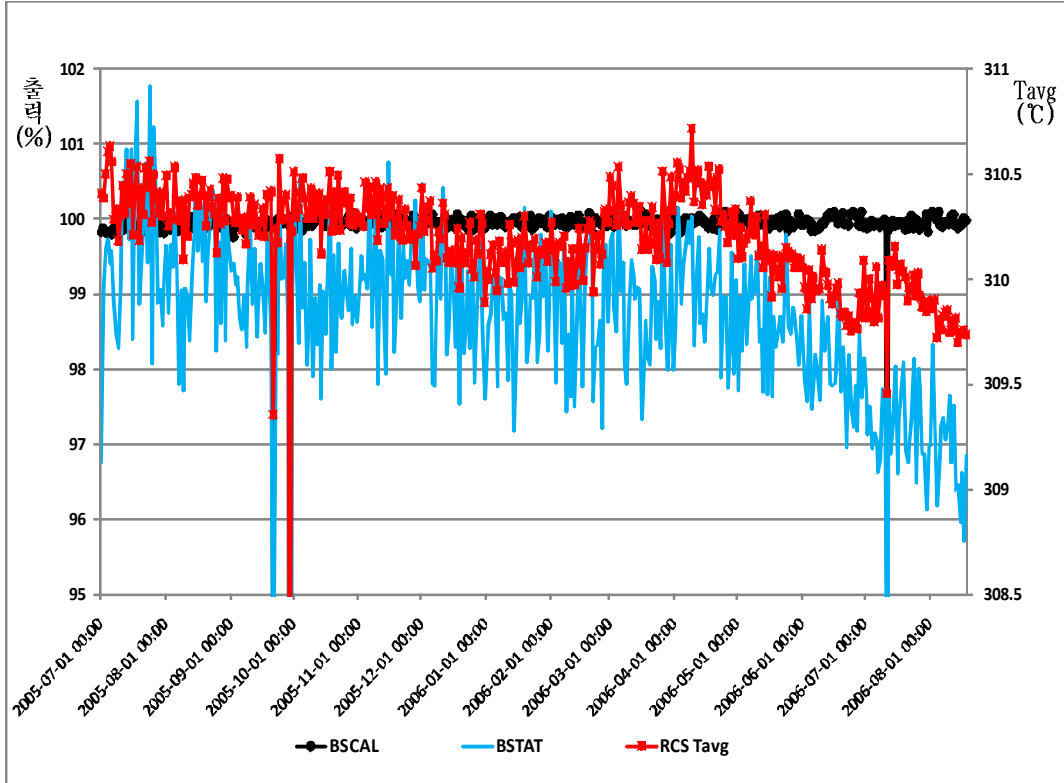


그림 2.2.4 영광5호기 4주기 2차측 출력(FWBSCAL) 및 정적 1차측 출력 변화

2.4 주급수 및 주증기 유량 변화

4주기 중 주급수유량은 거의 일정한 상태를 유지하는 반면 주기의 진행에 따라 증기유량은 약간의 감소 추세를 보이고 있다.

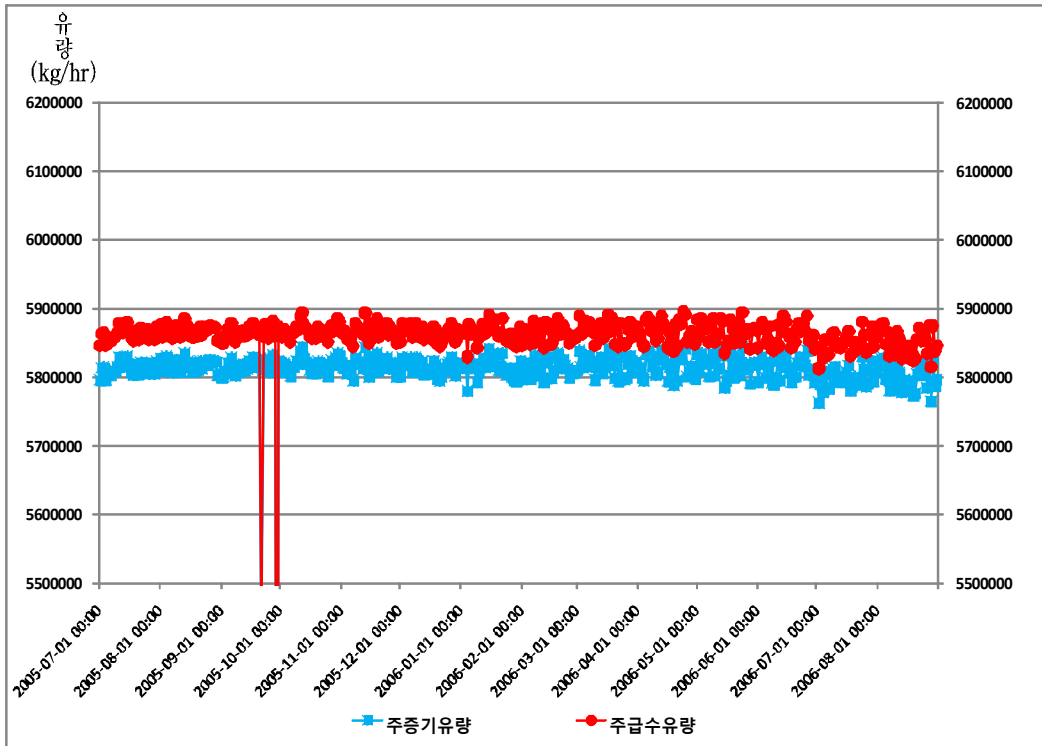


그림 2.2.5 영광5호기 4주기 주급수 및 주증기 유량 변화

2.5 주증기 및 터빈 1단 압력 변화

4주기 중 BSCAL은 거의 일정한 상태가 유지되고 있으나 각 주기의 진행에 따라 터빈 1단 압력 및 주증기 압력은 감소 추세를 보이고 있으며, 터빈 1단 압력의 감소는 주증기압력 감소에 기인하며 주증기 압력의 감소는 T_{avg} 감소에 기인하였다.

HP TBN 1단 압력은 1차측 열출력 변화에 선형적으로 대응하는 특성이 있고, 2차측 열출력이 높게 계산되어 1차측 열출력이 감소함에 따라 주증기 압력 및 증기발생기 온도가 감소하여 터빈 출력이 감소하였다.

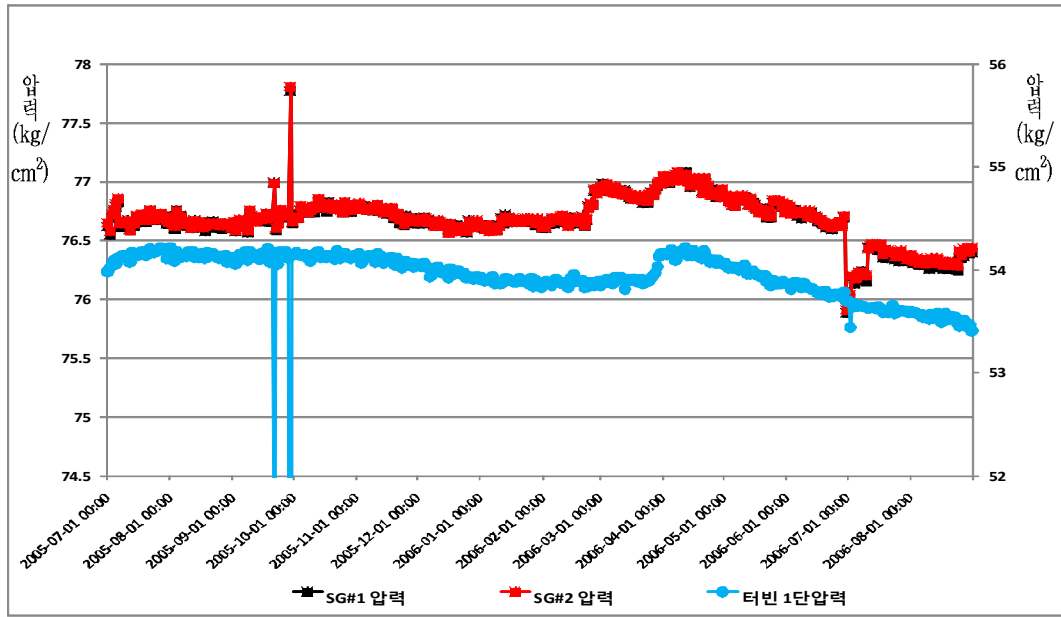


그림 2.2.6 영광5호기 4주기 주증기 및 터빈 1단 압력 변화

2.6 2차측 출력(FWBSCAL) 및 주급수 온도 변화

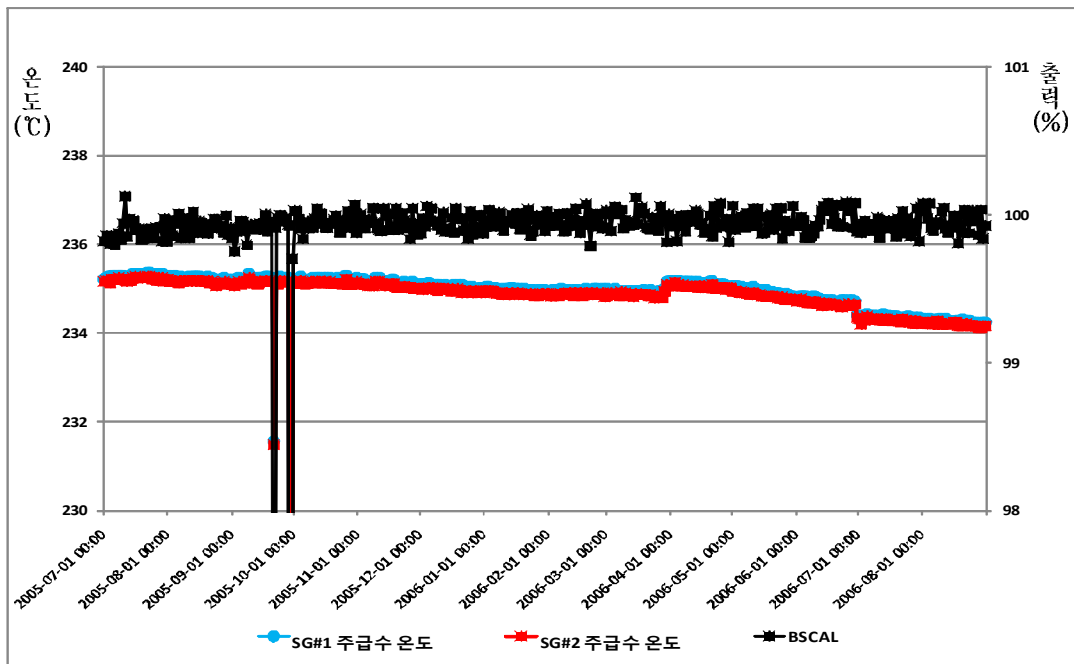


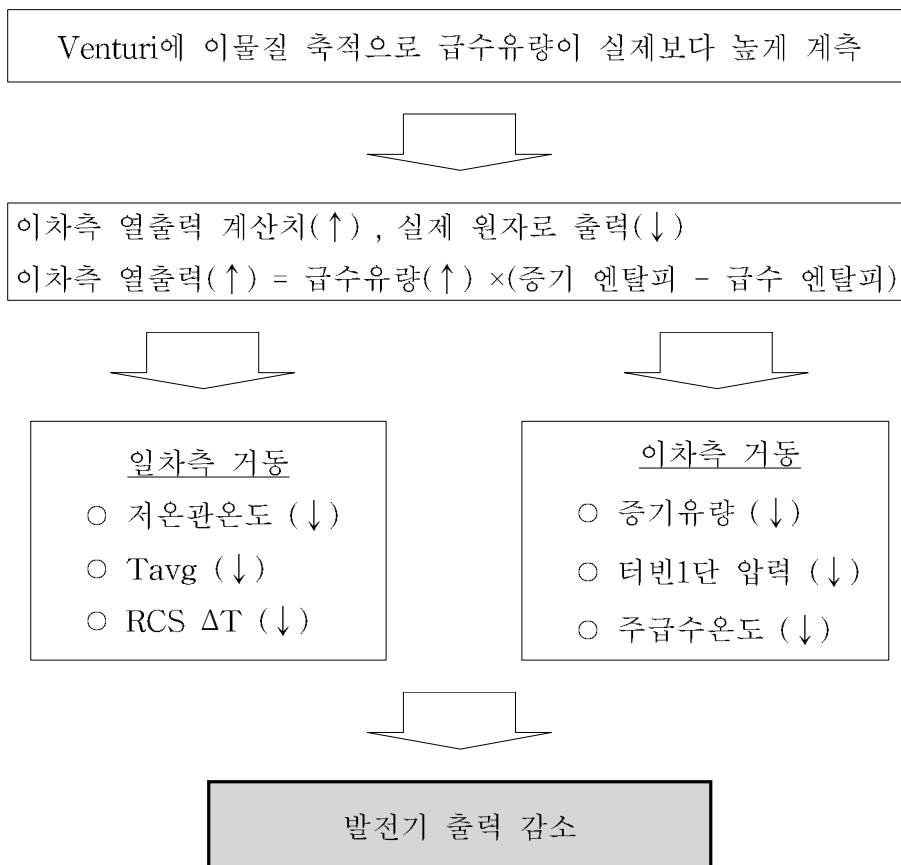
그림 2.2.7 영광5호기 4주기 2차측 출력(FWBSCAL) 및 주급수 온도 변화

4주기 중 BSCAL은 거의 일정한 상태가 유지되고 있으나 주기의 진행에 따라 주급수온도가 감소 추세를 보이고 있다. 주급수온도의 감소는 터빈출력의 감소로 추기증기의 감소에 기인하나 '07. 7월 이후(4주기) 큰 폭으로 감소하고 있다.

3. 출력 감소 원인

출력관련 주요 운전변수(Tavg, BSTAT, 증기유량, 주급수온도/압력, 터빈 1단 압력)의 감소는 원자로출력의 실질적 감소와 전기출력 감소를 의미하는데 COLSS BSCAL이 일정하게 출력을 유지하는 이유는 주급수유량 계측오차로 인한 COLSS BSCAL의 과대평가로 분석 되었으며, 엔탈피 변화를 이용한 검증 결과 일차측에서 약 2%정도의 출력감소가 발생된 것으로 평가되었다.

표 2.25 주급수 Venturi Fouling 시 증상



제 3 장 열출력 측정방법 개선(주증기 유량기반 열출력 측정)

제 1 절 주증기유량 기반 원자로 열출력 측정식

1. 증기발생기 유량 평형식

주증기유량 기반 열출력 (MSBSCAL) 계산 방법론은 측정 주증기유량과 취출수 유량을 이용하여 주급수유량을 계산하는 방법이다. 따라서 원자로 열출력 측정식에서 측정된 주급수유량을 사용하지 않고 다음식에 의하여 계산된 값을 이용한다.

$$W_{FWC} = W_{MSM} + W_{BD} \quad (3.1)$$

W_{FWC} = 증기발생기로 공급되는 주급수유량 (계산값)

W_{MSM} = 증기발생기를 떠나는 주증기유량 (측정값)

W_{BD} = 증기발생기를 떠나는 취출수유량 (설계값)

2. 주증기 질량유량 측정식

증기발생기에 부착된 유량 측정장치인 증기노즐은 차압식 유량계이므로 다음과 같은 차압식 유량계에 의한 질량 유량 측정식을 적용한다. 이식은 FWBSCAL 측정식에서 적용된 것과 기본적으로 동일한 함수 형태이다.

$$W_{MSM} = k \left[\frac{Y d^2 F_a}{\sqrt{1-\beta^4}} \right] \left[\frac{\sqrt{\Delta P_{EQ}}}{\sqrt{v_s}} \right] (MSCF) \quad (3.2)$$

W_{MSM} = 측정 주증기 질량유량

k = 단위변환 상수

$MSCF$ = 주증기유량 교정상수 (Main Steam Calibration Factor)

Y = 유체 압축계수 (compressibility)

d = 노즐의 목 직경

F_a = 노즐유로 면적 열팽창 계수 (area expansion factor)

- β = 연결 배관 직경에 대한 노즐 목 직경의 비
- ΔP_{EQ} = 주증기유량 측정차압
- V_s = 주증기 비체적

위 식에서 주증기유량 측정차압은 국내의 표준형 원자력 발전소의 경우 증기발생기당 2개의 증기노즐이 설치되어 증기유량 유로가 2개이므로 주증기유량을 증기발생기 단위로 계산하기 위하여 2개의 증기노즐 유량을 합하여야 하지만, 본 방법론에서는 다음의 식을 만족하는 유량 차압을 구하여 적용한다.

$$\sqrt{\Delta P_{EQ}} = 2 \sqrt{\frac{\Delta P_{MS1} + \Delta P_{MS2}}{2}} = 2 \sqrt{\Delta P_{MS}} \quad (3.3)$$

□

위의 식에서 ΔP_{MS1} 과 ΔP_{MS2} 는 증기노즐 측정차압이다. 위와 같은 방법은 2개의 증기노즐의 측정차압의 평균값을 사용하여 질량유량을 계산한 후 그 값을 2배 하는 방법에 해당한다. 최종적으로 수립된 주증기 질량유량 측정식은 다음과 같다.

$$W_{MSM} = k \left[\frac{Yd^2 F_a}{\sqrt{1-\beta^4}} \right] \left[\frac{2\sqrt{\Delta P_{MS}}}{\sqrt{v_s}} \right] (MSCF) \quad (3.4)$$

$$\Delta P_{MS} = \frac{\Delta P_{MS1} + \Delta P_{MS2}}{2} \quad (3.5)$$

2.1 질량유량 측정식에 필요한 증기압력(SGP)

주증기 질량유량 측정식에 포함된 비체적, 유로면적 열팽창계수와 압축계수를 계산하는데 필요한 증기압력은 안전채널 증기압력을 직접 이용한 중앙평균 압력을 이용한다. 여기서 결정된 증기압력은 질량유량 측정식에서만 적용되며 원자로열출력 측정식의 엔탈피를 구하기 위해 적용되는 증기압력은 FWBSCAL 방법론에서 적용하는 것과 동일하다.

2.1.1 측정 중앙평균 증기압력 (MSGP)

증기발생기당 4개의 안전채널 측정압력에서 최대값과 최소값을 제외한 나머지 2개 값의 평균값으로 결정한다 (center-averaging, 중앙평균).

$$MSGP = \frac{\sum_{i=1}^4 MSG_i - \min(MSG_i) - \max(MSG_i)}{2} \quad (3.6)$$

MSGP = 측정 중앙평균 증기압력

MSG_i = 안전채널 측정 증기압력 (증기발생기당 4개)

min(MSG_i) = 안전채널 측정압력중 최소값

max(MSG_i) = 안전채널 측정압력중 최대값

2.1.2 최종 증기압력 (SGP)

주증기 질량유량 측정식에 필요한 증기압력은 다음과 같이 2.1.1에서 구한 안전채널 중앙평균 압력을 적용한다.

$$SGP = MSGP \quad (3.7)$$

위의 압력은 주증기 질량유량 측정식에서만 이용된다.

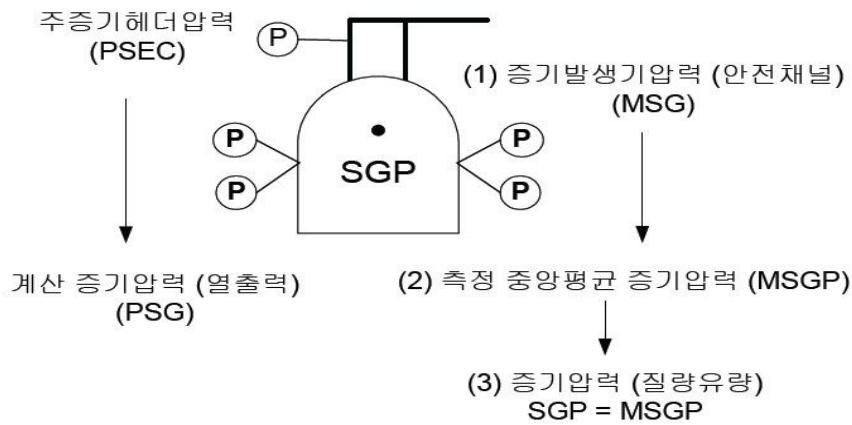


그림 3.1.1 주증기 압력 결정

2.2 주증기유량교정상수(MainSteamCalibrationFactor,MSCF)

교정상수는 이론적으로 유량 측정장치의 방출계수 (discharge coefficient)에 해당한다. 증기발생기에 부착되어 있는 증기노즐의 경우 이 값을 실험실 조건에서 정확하게 측정할 수 있는 방법이 없다. 따라서 여기에서는 매주기 초에 주증기 질량유량 측정식에 의한 주증기 질량유량을 측정 주급수 질량유량과 동일하도록 교정상수를 결정하여 적용한다. 취출수가 차단된 상태의 평형상태 조건에서는 증기발생기로 공급되는 주급수유량과 증기발생기를 떠나는 주증기유량이 동일하므로 이를 이용하여 교정상수 값을 결정하는 방법으로서 시험조건 및 취득 자료는 다음과 같으며 구체적인 절차서가 개발되어 운용된다.

주증기 교정상수 시험조건

- 매 주기초 주급수 벤츄리 파울링 진행 이전 (clean venturi condition)
- 100 % 출력조건
- 취출수 차단 조건
- 최소 3시간 동안 자료 취득

필수취득자료

- FWBSCAL 방법론에 의한 주급수 질량유량 (COLSS 측정유량)
- MSBSCAL 방법론에 의한 주증기 질량유량 (COLSS 측정유량)
- 이전에 설정된 교정상수 (MSCF)

특정기간 취득된 자료는 오염신호 제거와 사용자료 허용조건 만족여부 과정을 거친 후 각 증기발생기에 대하여 다음 식에 의하여 결정한다.

$$MSCF_{NW} = \frac{W_{FW}}{W_{MS}} \cdot MSCF_{OLD} \quad (3.8)$$

MSCF_{NW} = 새로 결정된 주증기유량 교정상수

MSCF_{OLD} = 이전의 주증기유량 교정상수

W_{FW} = FWBSCAL 방법론에 의한 주급수 질량유량 (COLSS 자동 계산)

W_{MS} = MSBSCAL 방법론에 의한 주증기 질량유량 (COLSS 자동 계산)

2.3 유로면적열팽창계수

증기 온도 변화에 따른 증기노즐의 유로면적 변화를 동적으로 고려하기 위하여 증기온도의 일차함수로 근사된 식을 적용한다 (그림 2.2 참조). 증기발생기 운전온도 대부분의 영역에서 (약 200 °F 이상) 계수의 값이 온도에 따라 거의 선형적으로 변하는 특성을 참고하여 다음과 같이 주증기 포화온도의 일차함수로 근사하였다.

$$F_a = 0.9982 + 2.0 \times 10^{-5} T_{sat} \quad (3.9)$$

F_a = 면적 열팽창 계수

T_{sat} = 주증기 포화온도 (°F)

영광 3, 4호기 증기발생기의 증기노즐의 재료는 SA-508 Class 1a, 즉 탄소강이다. 그러나 주증기 온도에 따른 변화율이 약간 크게 나타나는 300 Series SS의 경우를 적용한다. 이렇게 함으로써 100 % 출력 조건에서 구한 교정상수 값을 적용한 질량유량 측정식이 그 이하의 출력 (출력이 감소할수록 증기온도 증가)에서 질량유량을 보수적으로 약간 크게 계산되도록 하기 위함이다.

2.4 증기압축계수

증기의 경우 과냉각 상태의 주급수와는 달리 압축성이 존재한다. 이를 고려하기 위하여 증기를 이상기체로 가정한 다음과 같은식을 적용한다. 압축계수 Y 는 직경 비, 압력 비 r , 비열 비 γ 의 함수로서 비압축성에 대해서는 1, 압축성 유체의 경우는 1보다 작다.

$$Y = \sqrt{r^{2/\gamma} * \frac{\gamma}{\gamma-1} * \frac{1-r^{\gamma-1/\gamma}}{1-r} * \frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 r^{2/\gamma}}} \quad (3.10)$$

Y = 증기 압축계수 (compressibility)

γ = 주증기 정적 비열과 정압 비열의 비

β = 증기 노즐의 목과 연결배관 내경의 비

r = 증기 노즐 목 부위 압력 비

주증기 노즐 목 부위 압력과 증기압력과의 비는 다음과 같이 구하며, 목 부위의 압력은 증기압력에서 증기노즐에서 발생하는 압력강하 값을 고려하여 계산한다.

$$r = \frac{P_T}{SGP} = \frac{SGP - \Delta P_{MS}}{SGP} \quad (3.11)$$

P_T = 주증기 노즐 목 부위 압력

ΔP_{MS} = 주증기유량 측정차압의 평균 = $\frac{\Delta P_{MS1} + \Delta P_{MS2}}{2}$

SGP = 증기압력(MSGP)

정적 비열과 정압 비열의 비 γ 는 다음 식을 적용한다.

$$\gamma = 1.20625 + 0.2X - 0.000625 \times T_{sat} \quad (3.12)$$

γ = 정적 비열과 정압 비열의 비

T_{sat} = 주증기 포화온도 (°F)

X = 증기 건도

3. 주증기 유량기반 원자로 열출력 측정식

MSBSCAL 방법론에서는 주증기유량은 측정된 값을 이용하고 주급수유량은 식 (3.1)의 유량 평형식을 이용하여 계산된 값을 이용한다. 따라서 MSBSCAL 방법론에서 증기발생기를 제어체적으로 한 열평형식은 다음과 같다.

$$Q_{MS} = W_{MSM} * h_{MS} + W_{BD} * h_{BD} - W_{FWC} * h_{FW} \quad (3.13)$$

Q_{MS} = MSBSCAL 증기발생기 열출력

h_{MS} = 주증기 엔탈피

h_{FW} = 주급수 엔탈피

h_{BD} = 취출수 엔탈피

열평형식에 포함된 주증기 엔탈피를 결정하기 위하여 필요한 증기압력 (PSG)은 FWBSCAL 방법론에서 적용하는 식과 동일하다.

식 (3.13)의 열평형식을 유량 평형식을 이용하여 측정 또는 상수 입력 변수로 구성된 식으로 표현하면 다음과 같이 측정 주증기유량 및 취출수유량으로 구성된 식으로 변환된다.

$$Q_{MS} = W_{MSM}(h_{MS} - h_{FW}) + W_{BD}(h_{BD} - h_{FW}) \quad (3.14)$$

최종적으로 MSBSCAL 열출력은 2대의 증기발생기 열출력의 합에 계통으로의 에너지 입력 (EC) 및 손실 (EL)을 고려하여 다음과 같이 결정된다.

$$MSBSCAL = Q_{MS1} + Q_{MS2} + EL - EC \quad (3.15)$$

- Q_{MS1} = 증기발생기 1의 열출력 (식 3.14 이용)
- Q_{MS2} = 증기발생기 2의 열출력 (식 3.14 이용)
- EL = 제어체적으로부터의 에너지 손실 (energy loss)
- EC = 제어체적으로부터의 에너지 입력 (energy credit)

제 2 절 주증기유량 기반 원자로 열출력 알고리즘

1. MSBSCAL 적용 COLSS 알고리즘

MSBSCAL 방법론 적용을 위한 COLSS 알고리즘 추가는 개념적으로 크게 세 부분으로 구성된다. 첫째는 입력처리 부분, 두 번째는 주증기유량 기반 열출력을 계산하는 부분 그리고 세 번째는 주증기유량 기반 열출력 (MSBSCAL) 과 주급수유량 기반 열출력(FWBSCAL) 중에서 감시기준 출력으로 BSCAL을 선택하는 부분으로 구분된다. 입력처리부는 COLSS의 Block A에 해당하며 MSBSCAL 열출력 계산과 BSCAL을 선택부분은 Block F에 해당한다. 이에 대한 개념도가 그림 3.2에 나타나 있는데 기존의 FWBSCAL 열출력과 평행하게 계산이 이루어진다. 즉, MSBSCAL 적용 감시운전 허용 여부와 관계없이 관련 컴퓨터시스템에 의하여 자동으로 MSBSCAL 열출력이 계산되며, 다만 그의 감시기준 열출력으로서의 실제 적용은 감시기준 출력 선택 설정에 의하여 결정된다.

입력처리 부분인 Block A에서는 MSBSCAL 방법론 적용에 따라 추가된 필요 공정변수에 대한 선처리가 수행된다. 즉, 해당 변수의 유효 범위 확인 (range check)이 이루어진다. 새로이 추가되거나, 선처리 과정이 추가된 공정변수는 다음과 같다.

증기발생기 안전채널 압력 신호 (증기발생기 당 4개)

주증기 유량 차압신호 (증기발생기 당 2개)

위의 신호 중 주증기 유량 차압신호는 기존의 FWBSCAL 방법론에서 이미 이용되고있는데 미리 선정된 증기발생기 당 1개의 신호를 이용한다. MSBSCAL 방법론에서는 주증기 질량유량 계산시 2개 신호의 평균값을 추가로 이용하는 점이 다르다. 열출력을 계산하는 부분인 Block F에서는 3장에서 기술한 MSBSCAL 방법론에 따른 실제 열출력 계산이 이루어진다. 상세한 계산 흐름도가 그림 3.3에 나타나 있다.

감시기준 열출력 선택논리 부분은 계산된 2개의 열출력 중에서 운전원에 의하여 미리 설정한 (COLSS 상수를 통한 설정) 조건에 따라 감시 기준출력으로 적용할 열출력을 실제 선택하는 부분이다.

MSBSCAL 방법론의 상세한 알고리즘은 부록의 참고문서 I-1에 수록되어 있는데 추가 또는 수정된 부분의 오른쪽에 세로 막대로 표시되어 있다.

2. 발전소 감시 기준출력 선택

운전원에 의하여 미리 관련 COLSS 상수 (OPMS) 값을 설정함으로써 MSBSCAL 열출력을 인허가 출력 감시 기준출력 (BSCAL)으로 선택할 수 있다. OPMS를 설정하지 않으면(RESET) 기존의 FWBSCAL 열출력이 감시 기준출력이 된다.

MSBSCAL 열출력이 감시 기준출력으로 선택되는 경우는 다음의 조건을 모두 만족하여야 하며 어느 한 조건이라도 만족되지 않으면 기존의 FWBSCAL이 발전소 열출력으로 선택된다.

- ① 운전원 MSBSCAL 선택 스위치 SET (OPMS = SET)
- ② 출력 $\geq 95\%$ (MSBSCAL \geq MSOFF)
- ③ MSBSCAL 품질 (Quality) 정상 (GOOD)

MSBSCAL 적용 운전 중이더라도 다음의 어느 하나의 조건에 해당할 경우 기존의 FWBSCAL 적용 운전으로 자동 복귀된다.

- ① 운전원 MSBSCAL 선택 스위치 RESET (OPMS = RESET)
- ② 출력 $< 95\%$ (MSBSCAL $< 95\%$)
- ③ MSBSCAL 품질 (Quality) 나쁨 (BAD)

MSBSCAL 적용 운전 중 (OPMS = SET)이더라도 출력이 95% 미만으로 감소되는 경우 자동으로 FWBSCAL 열출력이 감시기준 출력으로 선택된다. 이후 다시 출력 재상승으로 MSBSCAL 적용 허용출력인 95% 이상이 될 경우에는 MSBSCAL 열출력이 BSCAL 열출력으로 선택되도록 운전된다.

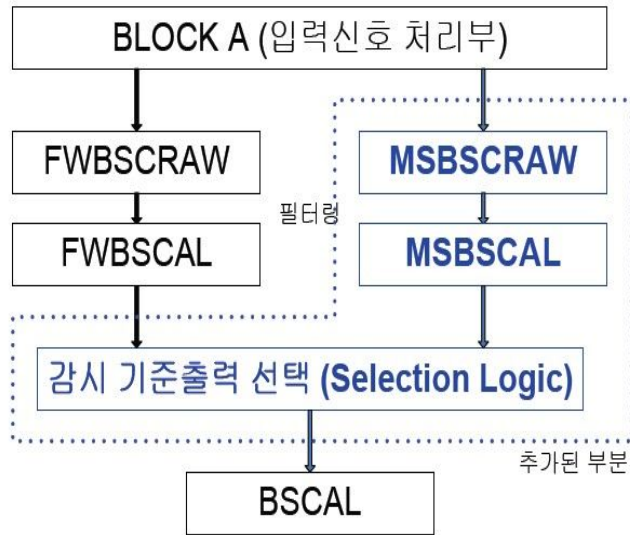


그림 3.2.1 COLSS 열출력 계산모듈 개념

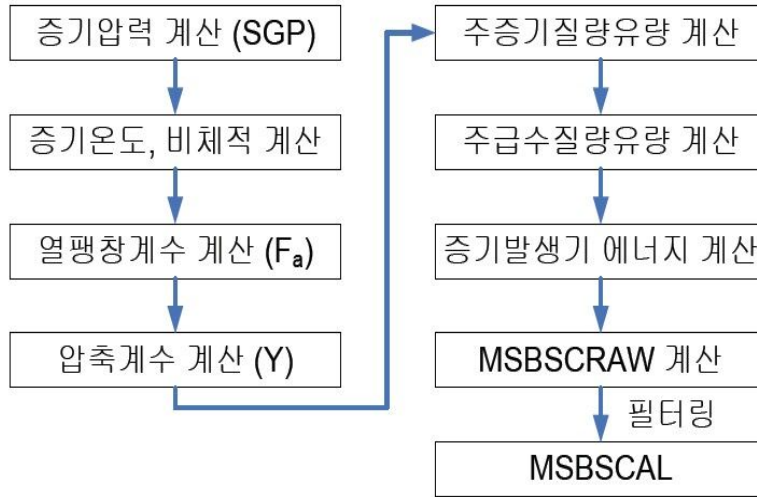


그림 3.2.2 MSBSCAL 열출력 계산 흐름도

제 3 절 영광 4호기 주증기 유량기반 열출력 적용

국내 표준형 발전소의 MSBSCAL 열출력 도입에 따른 주급수 파울링(주급수 유량 과대측정) 현상 해소와 관련하여 영광 4호기 12주기 운전 중 발전소 주요 운전 변수를 검토하였다.

1. 1,2차측 열적 주요운전변수 검토

1.1 2차측 출력(MSBSCAL) 및 전기출력 변화

12주기 중 MSBSCAL 및 터빈출력은 거의 일정한 상태가 유지되고 있으나 전기출력의 감소 경우 계절적인 영향, 즉 해수온도 상승으로 인한 복수기 진공도를 저하시켜 전기출력 감소 현상으로 나타나고 있다.

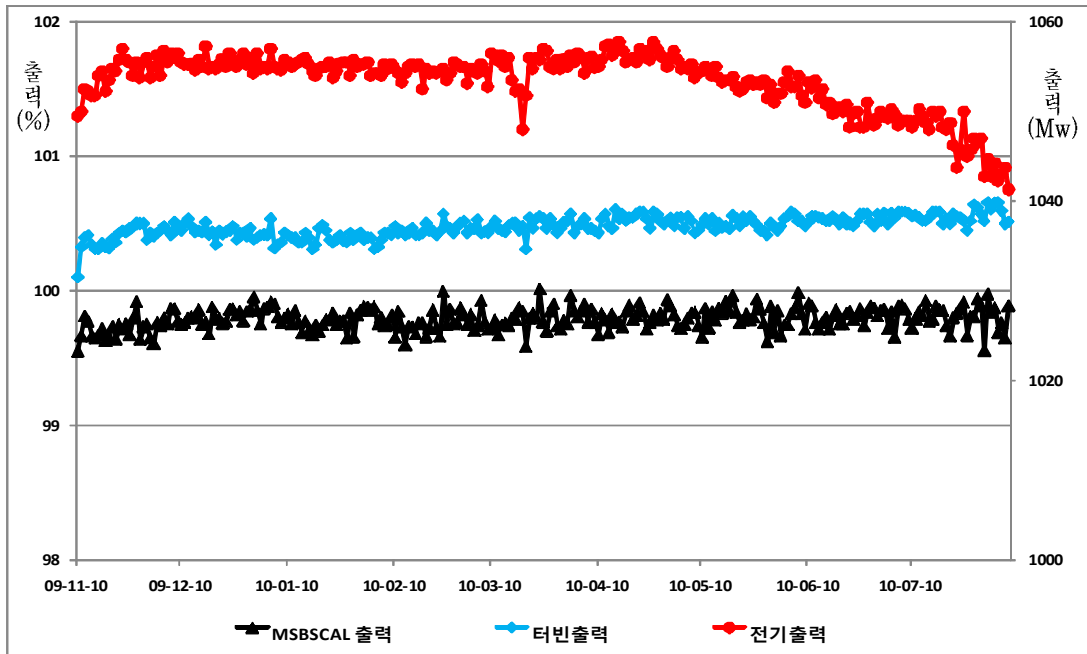


그림 3.3.1 영광4호기 12주기 2차측 출력(MSBSCAL) 및 전기출력 변화

1.2 2차측 출력(MSBSCAL) 및 정적 1차측 출력 변화

12주기 중 MSBSCAL 및 RCS 평균온도(Tavg)은 일정한 상태가 유지되고 있으며 이는 정적 1차측 출력(BSTAT) 유지로 나타나고 있다.

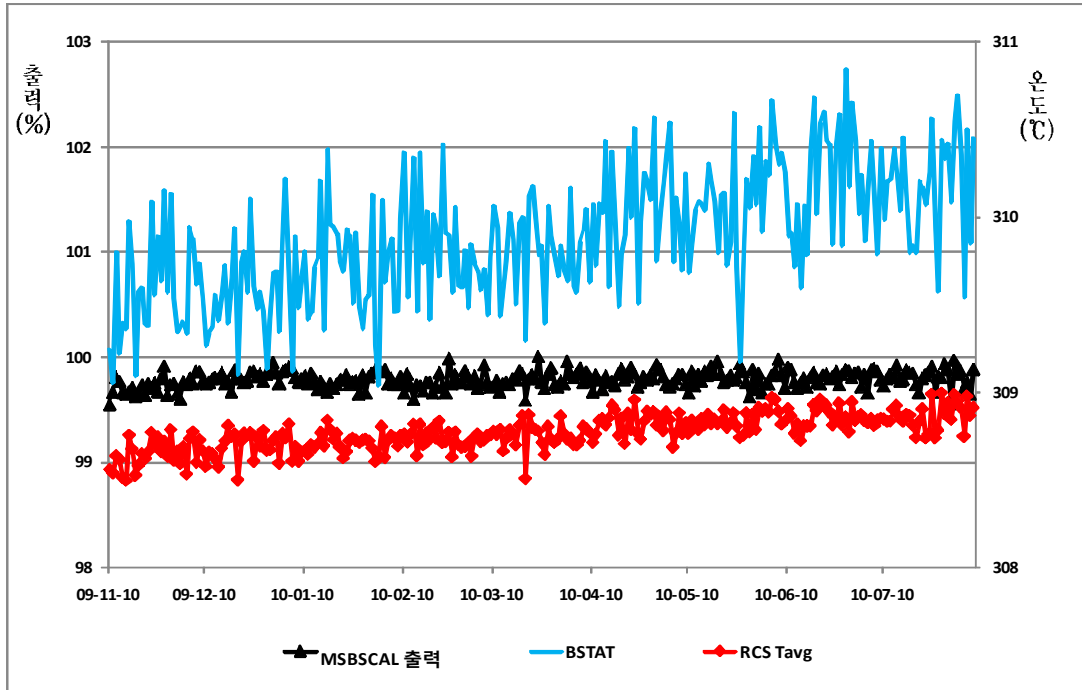


그림 3.3.2 영광4호기 12주기 2차측 출력(MSBSCAL) 및 정적 1차측 출력 변화

1.3 주급수 및 주증기 유량 변화

12주기 중 주기의 진행에도 주급수 유량 및 증기 유량이 거의 일정한 상태를 유지하는 것은 2차측 열출력(MBSCAL)의 중요 계산 인자인 증기유량 계측으로 인한 급수 유량의 계측오류를 방지함으로써 급수유량이 높게 계측되는 현상을 해소하였다.

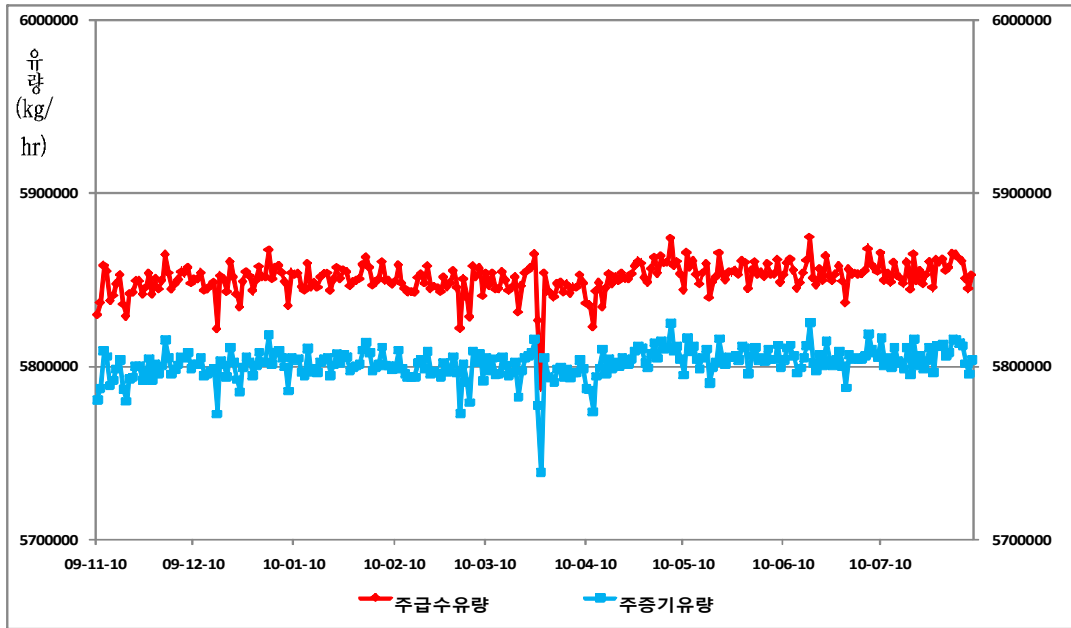


그림 3.3.3 영광4호기 12주기 주급수 및 증기 유량 변화

1.4 주증기 및 터빈 1단 압력 변화

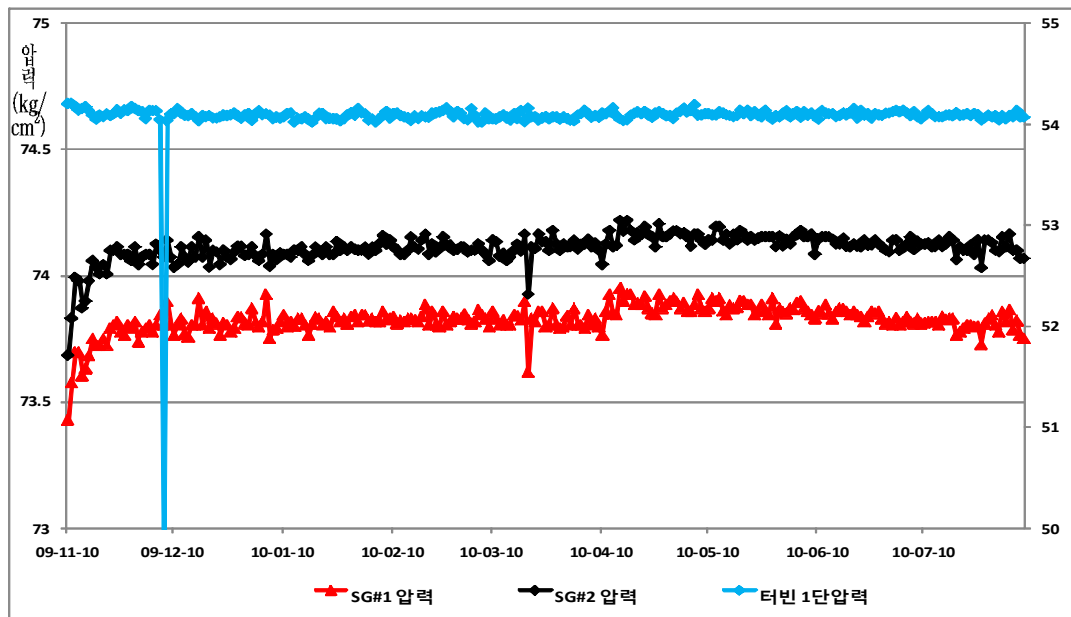


그림 3.3.4 영광4호기 12주기 주증기 및 터빈 1단 압력 변화

12주기 중 MSBSCAL 도입에 따른 터빈 1단 압력 및 주증기 압력이 거의 일정한 상태가 유지되고 있다.

1.5 2차측 출력(MSBSCAL) 및 주급수 온도 변화

12주기 중 MSBSCAL 및 주급수 온도가 일정한 상태를 유지되고 있음을 알 수 있다.

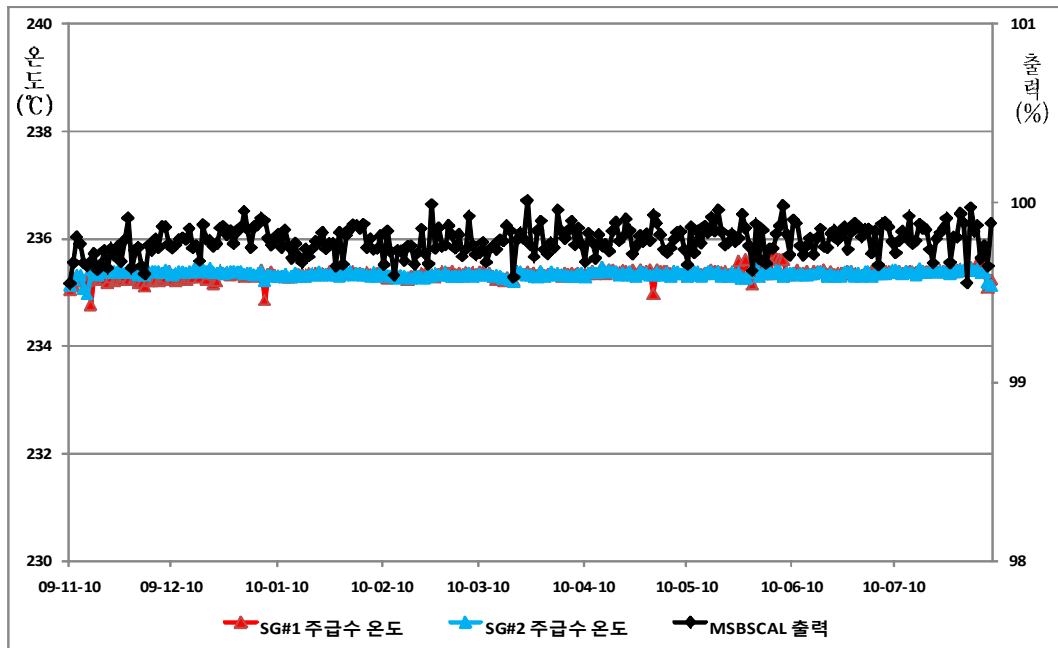
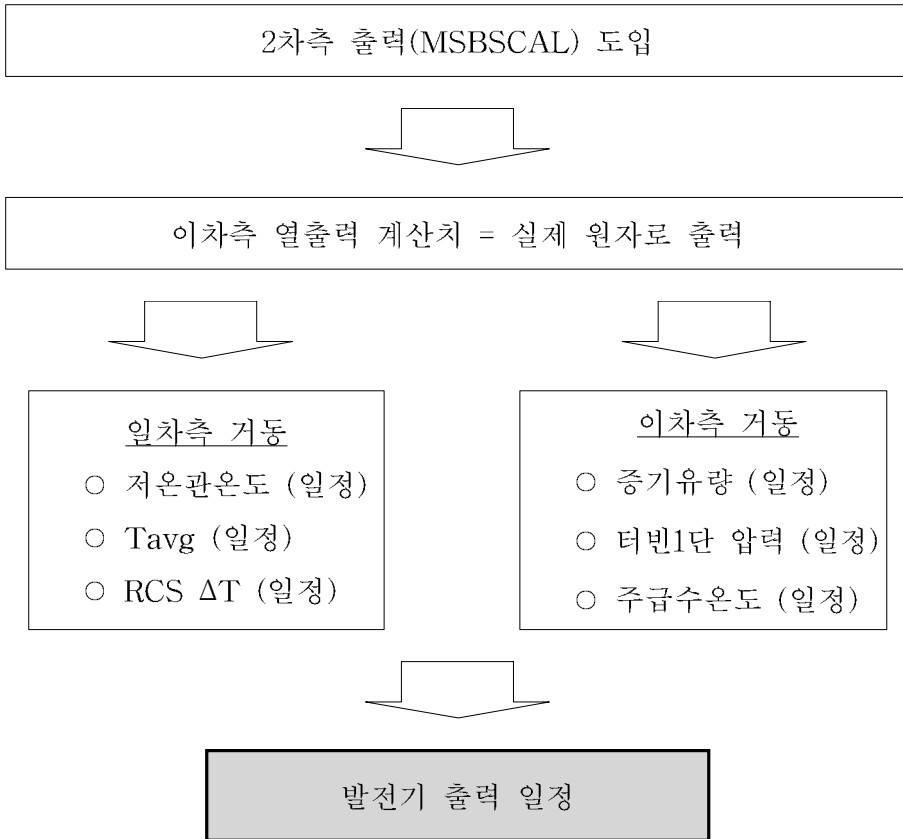


그림 3.3.5 영광4호기 12주기 2차측 출력(MSBSCAL) 및 주급수 온도 변화

2. 열출력 검토

국내 표준형 원자력 발전소 전기출력 감소의 근본적인 원인은 2차측열출력(FWBSCAL)의 중요 계산인자인 급수유량이 높게 예측되어 발생하는 것으로 그 문제점을 해결하기 위하여 2차측열출력(MSBSCAL) 도입에 따른 주급수 Venturi Fouling(주급수유량 계측오류) 해소와 관련하여 모든 발전소 출력관련 변수(RCS Tavg, 주증기 유량, 주급수 유량, 주증기 압력, 주급수 온도, 터빈 1단 압력)가 일정하게 유지시킬 수 있었다.

표 3.3.1 주급수 Venturi Fouling 해소에 따른 증상



제 4 장 결 론

본 연구에서는 첫째로 국내 표준형 원자력 발전소에서 기존 열출력 계산방법론인 주급수 유량 기반 열출력(FWBSCAL) 이용시 발전소 운전중 운전시간이 경과함에 따라 주급수 유량 측정장치인 주급수 벤츄리에서 이물질 침작(Fouling)으로 인하여 계산한 원자로 열출력이 실제보다 작게 평가되는 영광 5호기 열적 주요운전변수에 대하여 분석하였다.

그리고 주급수 유량기반 열출력(FWBSCAL)의 문제점을 해결하기 위한 새로운 원자로 열출력 계산 방법으로서 주증기 유량기반 열출력(MSBSCAL) 방법론을 적용하였다. 기존의 주급수유량 대신에 주증기유량을 이용하여 열출력을 계산하기위한 주증기 질량유량 측정식 수립, 측정식의 입력 인자 결정식 수립에 대하여 분석하였고 발전소 운전제한치감시계통의 열출력 계산 모듈에 기존의 열출력 계산(주급수 유량기반 열출력) 모듈과 병행하게 주증기 유량기반 열출력을 추가함으로써 서로 독립적이고 다양성을 갖춘 2가지 방법에 의한 열출력 감시가 가능해져 발전소 인허가 열출력 감시의 효율성 및 안전성을 제고 하였다.

본 연구에서 마지막으로 주증기 유량기반 열출력(MSBSCAL) 도입에 따른 영광 4호기 원자력 발전소의 발전소 열적 주요운전변수를 분석을 통하여 주급수 벤츄리 파울링이 해소됨을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] EPRI TR-101388, Feedwater Flow Measurements in U.S. Nuclear Power Generation Stations, EPRI, 1992.11.
- [2] Fluid Meters (Their Theory and Application), ASME, 1971 Edition.
- [3] A-SG-FE-0078, Determination of Constants for SONGS-2,3 COLSS Secondary Calorimetric Calculation Based on Steam Flow, March 1998.
- [4] ASME PTC 19.5-2004, Flow Measurement.
- [5] KRIS-99-070-SP, KRIS Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, 1999.
- [6] ASME PTC 19.5-2004, Flow Measurement.
- [7] ASME PTC-19.1-1998, Test Uncertainty: Instruments and Apparatus.

감사의 글

조선대학교와 영광원자력 본부가 산학 협력을 맺은 다음해인 2009년에 대학원에 등록한 이후 어느 덧 종점을 향하고 있다. 그 동안의 대학원 생활이 내 기억 속 한 구석에 당당히 자리 잡을 정도로 재미있고 즐거웠던 추억임에 틀림이 없다.

2년의 대학원 생활 동안 시간적 여유 부족으로 힘들 때가 많았지만 주위에서 많은 분들이 도움을 주셔서 유종의 미를 거둘 수 있었다. 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, 정운관 교수님께도 감사드리며 매 학기 마다 큰 열정으로 심도 있는 강의를 해주신 나만균 교수님, 송종순 교수님, 김승평 교수님 및 영광원자력 본부 내 강재열 본부장님, 전재근 소장님, 장응수 소장님, 김대겸 소장님, 양창호 실장님, 양연석 실장님께도 진심 어린 감사를 드린다.

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

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학	학 번	20097286	과 정	석사
성 명	한글 : 박 종 화 한문 : 박 鍾 和 영문 : PARK CHONG-HWA				
주 소	전남 영광군 홍농읍 상하리 1373-7번지 한수원사택 1동 205호				
연락처	e-mail : pch123@khnp.co.kr				
논문제목	표준형 원전 주급수 Venturi Fouling 현상 및 대책에 관한 연구				
	A Study on Feedwater Venturi Fouling and Its Countermeasure				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

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.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2010년 10월

저작자 : 박 종 화



조선대학교 총장 귀하