

2011年度 2月
碩士學位論文

주급수/주증기 유량기반
原子爐 熱出力 測定에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

崔 仁 鎔

주급수/주증기 유량기반

原子爐 熱出力 測定에 관한 연구

A Study on Reactor Thermal Power Calculation Methodologies
Based on Feedwater Flowrate and Steam Flowrate for
OPR1000 Plants

2010年 11月 日

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

崔 仁 鎔

주급수/주증기 유량기반
原子爐 熱出力 測定에 관한 연구

指導教授 羅 滿 均

이 論文을 工學 碩士學位 申請 論文으로 提出함.

2010年 11月 日

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

崔 仁 鎔

崔仁鎔의 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 金 崧 平 印

委員 朝鮮大學校 教授 宋 鍾 淳 印

委員 朝鮮大學校 教授 羅 滿 均 印

2010年 11月 日

朝鮮大學校 大學院

목 차

표 목차	ii
그림 목차	iii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 원자로열출력 측정 방법론	3
제 1 절 주급수유량 기반 원자로열출력 측정방법	4
제 2 절 주증기유량 기반 원자로열출력 측정방법	8
제 3 절 COLSS 기준출력 선택 알고리즘	16
제 3 장 열출력측정 신뢰도 평가	21
제 1 절 불확실도(Uncertainty)	21
제 2 절 신뢰도 영향인자	25
제 3 절 열출력 측정오차 영향	37
제 4 절 열출력측정 신뢰도 향상대책	39
제 4 장 결 론	45

표 목차

표 2-1 주증기유량 측정차압 결정식의 계산값 변화	10
표 3-1 100% 출력조건에서 원자로열출력 계산인자들의 불확실도	24
표 3-2 포화증기 표	34
표 3-3 벤츄리 내부 슬러지 성분 분석결과	40
표 3-4 계측기 오차 영향	41

그림 목차

그림 2-1 증기발생기 열평형도	3
그림 2-2 주급수관 벤츄리	5
그림 2-3 증기압력 결정	11
그림 2-4 주증기유량 교정상수 결정	14
그림 2-5 원자로열출력 선택 개념	19
그림 2-6 영광3,4호기 COLSS 열출력 화면	20
그림 3-1 벤츄리 Fouling 발생시 증상	27
그림 3-2 2006년도 영광5호기 Fouling 발생경험(발전기출력 감소) ·	29
그림 3-3 2006년도 영광5호기 Fouling 발생경험(증기유량 감소) ····	30
그림 3-4 2006년도 영광5호기 Fouling 발생경험 (HP TBN 1단 압력 감소)	30
그림 3-5 2010년도 영광4호기 MSBSCAL/FWBSCAL 변화추이 ····	31
그림 3-6 2010년도 영광3호기 MSBSCAL/FWBSCAL 변화추이 ····	35
그림 3-7 2010년도 영광3호기 원자로열출력 관련변수 변화추이 ·····	36
그림 3-8 2010년도 영광3호기 MSBSCAL / FWBSCAL 교정 전, 후 비교	36

그림 3-9 영광 3,4호기 COLSS MARGINE 경보발생 논리	39
그림 3-10 $\Delta P/P$ 감시방법	44
그림 3-11 $\Delta P/P$ 방법 Monitoring 예	44

ABSTRACT

A Study on Reactor Thermal Power Calculation Methodologies Based on Feedwater Flowrate and Steam Flowrate for OPR1000 Plants

In-yong Choi

Advisor : Prof. Man Gyun Na

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

The Optimized Power Reactor (OPR1000) uses the secondary system calorimetric calculation method based on the feedwater flowrate as a Reactor Thermal Power (RTP) calculation method. However the fouling phenomena of Venturi meters increase the measured pressure drop across the Venturi meter, thereby causing the overestimation of the feedwater flowrate. As a result, RTP must be decreased to match the overestimated feedwater flowrate by Venturi meters to observe the operating nuclear power limit. To resolve this problem, the RTP calculation methodology based on the steam flowrate was additionally introduced at Yonggwang Nuclear Power Plant Unit 3&4 (YGN 3&4). However, it is not yet clear how accurate the methodology based on the steam flowrate could be and which methodology is more reliable because the methodology based on the steam flowrate was just introduced last year for the first time. For this reason, this thesis evaluated the reliability for these two methodologies and suggested a few approaches to improve the accuracy of the measurement.

In the steam flowrate calculation method, the steam flowrate measured by SG outlet nozzles is used instead of the feedwater flowrate measured by Venturies. Since the steam flow is measured by a differential pressure type instrument like a

Venturi meter, the steam flowrate equation uses the same equation as the feedwater flowrate equation uses. However there are some differences compared with the feedwater flowrate calculation. For the calculations of area expansion factor, steam specific volume and compressibility in the steam flow equation, safety class SG pressure meters are used. And also, the steam flowrate should be calibrated by the feedwater flowrate at the beginning of the fuel cycle when Venturi meters are not influenced with the fouling phenomenon because there is no way to remove steam outlet nozzles for calibrations. Thus, in order to calculate the steam flowrate, the main steam calibration factor(MSCF) is needed.

According to the evaluation results at the full power level of YGN 3&4, the uncertainties based on the feedwater flowrate and the steam flowrate are 0.969% and 1.34%, respectively. Considering the results, these two methodologies are acceptable. However, as yet, there is no single method that is guaranteed to ensure perfect confidence in RTP measurement. If instruments have measurement errors, it leads to the false RTP calculation. Thus it is necessary to implement some sort of monitoring to confirm that measurement errors are not occurring. In order to support more reliable determination of RTP, operators should monitor related parameters and analyze their trends. Except for Venturi fouling, the methodology based on the feedwater flowrate is more accurate than the methodology based on the steam flowrate. Thus it is important to monitor Venturi fouling phenomena. For example, HP turbine first-stage pressure is not influenced by Venturi fouling. Through monitoring the HP turbine first-stage pressure, we can early detect the Venturi fouling. Including the HP turbine first-stage pressure, it is very important to monitor and analyze related parameters (primary ΔT , feedwater temperature, SG pressure, steam header pressure, gross electric power, SG blowdown flowrate etc). The efficiency of error detection is dependent on the monitoring and analyzing skills. The accurate estimation of the error is essential. Through continuous monitoring and analysis for related parameters, we can expect the high level reliability of RTP measurement.

제 1 장 서 론

원자력발전소에서에서는 다양한 종류의 원자로열출력 감시수단을 가지고 있다. 노심에서 생성되는 중성자속을 측정하여 출력감시의 수단으로 이용하는 방법, 출력수준에 비례한 원자로냉각재 온도를 감시하는 방법, 증기발생기에서의 열평형상태를 이용한 이차측열출력 측정방법 등 각자 다른 고유의 수단을 이용하여 다양한 방법으로 원자로에서 생성되는 열출력을 감시하고 있다.

영광 3,4호기를 포함한 표준형원전(OPR1000 Plants)에서는 100% 출력준위에서 기준 출력으로 이차측열출력 측정방법을 적용하고 있다. 이는 높은 출력준위에서 신뢰도가 높기 때문이다. 중성자속을 이용하는 방법은 노심에서 원자로 외부로 누설되는 중성자를 측정하여 감시하므로 불확실도가 가장 높다. 원자로냉각재온도를 이용하는 방법은 잡음신호에 취약하여 인허가출력에 근접하여 운전하는데 불리하다. 이차측열출력은 증기발생기에 공급되고 배출되는 에너지를 여러 수단을 이용하여 측정해서 COLSS¹⁾에 전송하여 계산을 하게 된다. 그동안 표준형원전에서 사용하여 왔던 방법은 증기발생기에 공급되는 주급수유량을 측정하여 열출력을 계산하는 주급수유량 기반의 열출력 측정 방법이었다. 그런데 주급수유량을 측정하는데 이용되고 있는 벤츄리에 이물질이 침착(Fouling)되거나 이탈(Defouling)되어 정확한 유량 값을 대변하지 못하는 현상이 국내외 다수 보고가 되어왔다. Fouling의 경우 실제보다 많은 유량을 지시함으로써 이차측열출력은 과대평가된다. 따라서 원자로운전원은 인허가출력 범위내로 원자로열출력을 제한하기 위해 출력을 감발시키게 되는데 이는 원자력발전소 경제성에 손실을 유발한다. 반대로 Defouling의 경우 실제보다 적은 유량을 지시함으로써 인해서 이차측열출력은 과소평가된다. 이러한 현상들은 실제 원자로출력의 변동을 야기해 원자력발전소의 경제성 과 안전성에 영향을 끼치게 된다.

이러한 문제점을 방지하고자 그동안 여러 가지 연구가 진행되어 왔다. 그중에 하나가 2009년부터 영광원자력 3,4호기에서 적용하고 있는 주증기유량 기반의 이차측열출력 측정방법이다. 이 방법은 주급수유량 대신에 주증기유량을 측정하여 COLSS에서 계산하는 방법이다. 열출력 계산에 있어 주급수유량 대신에 주증기유량을 이용하는 것

1) COLSS : Core Operation Limit Supervisory System (노심 운전제한치 감시계통)

인데 COLSS 에서 계산하는 알고리즘은 대동소이하다. 주증기유량의 측정은 증기발생기 출구 증기배관에 설치된 노즐의 차압을 이용한다. 이 노즐은 주급수관 벤츄리에서 경험되는 Fouling 현상이 거의 없는 것으로 알려져 있다. Fouling 현상이 발생되던 시기 주증기관 노즐에서 측정된 차압의 거동을 관측해본 결과 실제 터빈에 공급되는 증기유량과 유사한 변화추이를 나타내었다. 이는 주증기관 노즐이 Fouling 과 무관하다는 것을 나타낸다. 단 주급수유량을 측정하기 위해 이용되는 벤츄리보다 정밀도에서 다소 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 단점을 해소하고자 발전소 기동초기 벤츄리 Fouling 현상이 발생하기 이전 주급수유량 기반의 이차측열출력으로 주증기유량 기반의 이차측열출력을 보정시키는 절차가 도입되었다. 또한 95% 이상의 출력준위에서만 주증기유량 기반의 이차측열출력을 이용하도록 하였다.

주증기유량 기반의 이차측열출력과 주급수유량 기반의 이차측열출력을 상호 보완적으로 사용하는 방법은 영광4호기가 2009년에, 영광3호기가 2010년에 도입되어 사용 중이고 점차 다른 표준형원전으로 확산될 계획이다. 이에 본 논문에서는 이들 2가지 측정방법론이 실제 원자로열출력을 얼마나 신뢰성 있고 효율성 있게 대변하고 있는지, 또한 개선되어야 할 사항은 없는지 연구하는데 목적이 있다.

제 2 장 원자로열출력 측정 방법론

COLSS에서 계산되는 원자로열출력은 증기발생기에서 배출되는 포화증기 유체의 열량에서 증기발생기로 유입되는 주급수 유체의 열량을 뺀 값으로 구해진다.

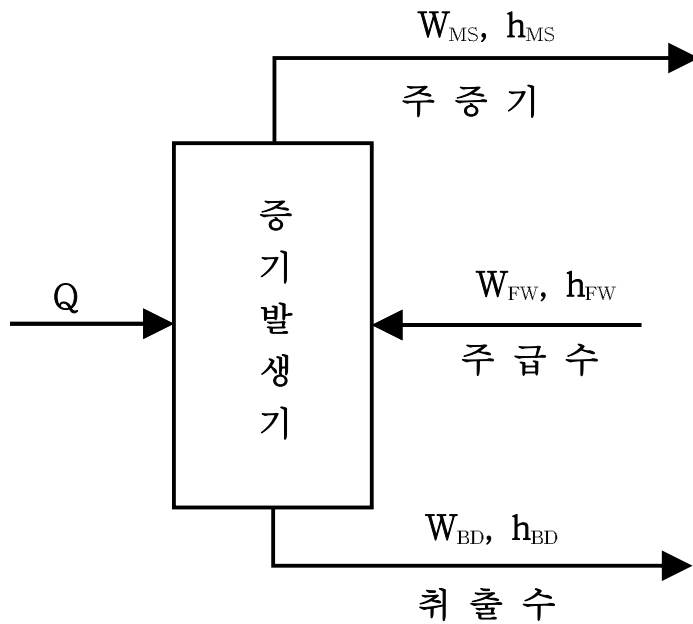


그림 2-1 증기발생기 열평형도

- Q = 원자로열출력
- W_{MS} = 증기발생기에서 배출되는 주증기유량
- W_{FW} = 증기발생기로 공급되는 주급수유량
- W_{BD} = 증기발생기에서 배출되는 취출수유량
- h_{MS} = 주증기 엔탈피
- h_{FW} = 주급수 엔탈피
- h_{BD} = 증기발생기 취출수 엔탈피

따라서 구하고자 하는 원자로열출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{원자로열출력}(Q) &= \text{“증기발생기에서 배출되는 주증기 에너지”} \\ &+ \text{“증기발생기 취출수 에너지”} \\ &- \text{“증기발생기로 공급되는 주급수 에너지”} \end{aligned}$$

$$Q = (W_{MS} \times h_{MS}) + (W_{BD} \times h_{BD}) - (W_{FW} \times h_{FW}) \quad (2-1)$$

제 1 절 주급수유량 기반 원자로열출력 측정방법

1. 증기발생기 유량평형식

증기발생기 유로는 그림 2-1 에서 나타난 바와 같이 증기유량, 급수유량, 취출수유량의 3가지 유로로 구성되어 있다. 정상적인 상태에서는 이들 3가지가 항상 평형을 이루고 있다.

$$W_{FW} = W_{MS} + W_{BD} \quad (2-2)$$

식 (2-2)에 따르면 2개의 변수만 알면 나머지 한 개의 변수가 구해진다. 주급수유량 기반의 방법에서는 급수유량과 취출수유량을 이용하고 증기유량은 계산식에서 구하여 사용한다.

따라서 증기발생기 유량평형식은 다음과 같다.

$$W_{MSC} = W_{FWM} - W_{BD} \quad (2-3)$$

W_{MSC} = 유량평형식에 의한 계산값

W_{FWM} = 주급수유량 측정값

W_{BD} = 취출수유량 설계값²⁾

2) 취출수유량은 미리 설정된 설계유량이 흐르도록 제작되어 있어 설계값을 사용한다.

2. 주급수 질량유량 측정식

주급수유량은 벤츄리를 이용한 차압식유량계를 이용하여 측정하므로 다음과 같은 식을 적용한다.

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

W_{FWM} = 측정 주급수 질량유량

k = 단위변환 상수

Y = 유체압축계수 (과냉각상태 유체 : 1 의 값을 적용)

C = 방출계수 (Venturi 제작자가 제공한 값)

d = 벤츄리 목 직경

F_a = 유로면적 열팽창 계수 (주급수온도 함수로 된 근사식 적용)

β = 연결배관 직경(D)에 대한 벤츄리 목 직경의 비(=d/D)

ΔP_{FW} = 유량 측정장치 (Venturi) 측정차압

v_{FW} = 유체의 비체적

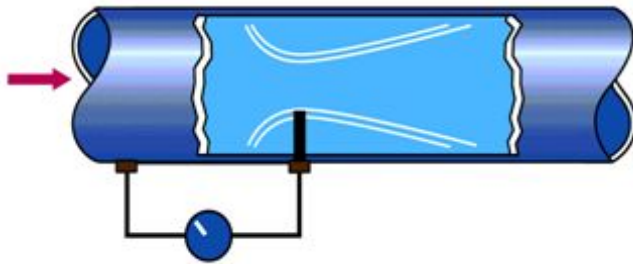


그림 2-2 주급수관 벤츄리

위 식 (2-4)에 의하면 주급수유량(W_{FWM})은 6개의 변수에 의해 결정된다. 벤츄리 차압(ΔP_{FW}), 주급수 비체적(V_{FW}), 열팽창계수(F_a)는 운전중 측정된 변수에 의존하고, 벤츄리의 방출계수(C), 목 직경(d) 및 배관직경(D)은 벤츄리 제작자가 제공하는 변수에 의존한다. 따라서 주급수유량(W_{FWM})은 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$W_{FWM} = f(C, F_a, d, D, \Delta P_{FW}, V_{FW}) \quad (2-5)$$

위에서 유체의 비체적(V_{FW})은 주급수의 온도(FWT) 및 압력(FWP)의 함수로서 여기에 필요한 주급수압력(FWP)은 주증기모관 부위에서 측정된 압력으로부터 다음의 식으로 계산된 값을 이용한다.

$$FWP = PSEC + a + b \cdot \Delta P_{MSS} \quad (2-6)$$

FWP = 주급수 압력

$PSEC$ = 주증기모관 측정압력

ΔP_{MSS} = 주증기유량 측정차압(미리 선택된 증기발생기 출구 Nozzle 차압)

a, b = 출력상승시험 시 결정되는 상수

또한 열팽창계수(F_a)는 주급수온도(FWT)의 함수이므로 최종적으로 주급수유량(W_{FWM})은 다음의 함수로 나타낼 수 있다.

$$W_{FWM} = f(C, d, D, \Delta P_{FW}, FWT, FWP) \quad (2-7)$$

3. 주급수유량 기반 원자로열출력(FWBSICAL) 측정식

주급수유량 기반 원자로열출력 계산에서 필요한 주급수유량은 측정된 값을 이용하고 주증기유량은 식 (2-3)의 유량평형식에서 얻어진 계산값을 이용한다.

$$\begin{aligned} Q_{FW} &= W_{MS}h_{MS} + W_{BD}h_{BD} - W_{FWM}h_{FW} \\ &= W_{FWM}(h_{MS} - h_{FW}) - W_{BD}(h_{MS} - h_{BD}) \end{aligned} \quad (2-8)$$

위 식 (2-8)에서 주증기엔탈피(h_{MS}) 및 취출수엔탈피(h_{BD})는 다음과 같다.

$$h_{MS} = Xh_g + (1-X)h_f \quad (2-9)$$

$$h_{BD} = X_{BD}h_g + (1-X_{BD})h_f \quad (2-10)$$

X = 주증기의 건도

X_{BD} = 취출수의 건도

h_g = 증기발생기 압력에서의 포화증기 엔탈피

h_f = 증기발생기 압력에서의 포화액체 엔탈피

여기서 증기의 엔탈피를 결정하기 위하여 필요한 증기발생기 압력(PSG)은 주급수유량을 계산하는데 필요한 주급수압력 결정식 (2-6)과 상수 값을 제외하고는 동일한 형태의 계산식에서 얻어진다.

$$PSG = PSEC + p + q \cdot \Delta P_{MSS} \quad (2-11)$$

PSG = 증기발생기 압력

PSEC = 주증기모관 측정압력

ΔP_{MSS} = 주증기유량 측정차압(미리 선택된 증기발생기 출구 Nozzle 차압)

p, q = 출력상승시험 시 결정되는 상수

또한 급수의 비체적을 구할 때 사용되었던 주급수온도(FWT)와 압력(FWP)은 주급수엔탈피 계산 시에도 동일 값을 적용한다. 따라서 주급수유량 기반 원자로열출력(Q_{FW})은 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$Q_{FW} = f(W_{FWM}, W_{BD}, h_{FW}, PSG, X, X_{BD}) \quad (2-12)$$

최종적으로 FWBSCAL 열출력은 2대의 증기발생기 열출력의 합에 계통으로의 에너지 입력 및 손실을 고려하여 다음과 같이 결정된다.

$$FWBSCAL = Q_{FW1} + Q_{FW2} + EL - EC \quad (2-13)$$

Q_{FW1} = 증기발생기 #1 열출력

Q_{FW2} = 증기발생기 #2 열출력

EL = 제어체적으로부터의 에너지 손실 (energy loss)

EC = 제어체적으로부터의 에너지 입력 (energy credit)

에너지 손실 및 입력의 주요 항목으로서는 계통에서의 에너지 손실 과 원자로 냉각재펌프로부터의 에너지입력이 있다. 이들은 핵연료장전후의 고온기능시험에서 얻어진 값을 적용한다.

제 2 절 주증기유량 기반 원자로열출력 측정방법³⁾

1. 증기발생기 유량평형식

주증기유량 기반 열출력(MSBSCAL)에서 주급수유량은 측정 주증기유량과 설계 취출수유량을 이용하여 계산한다.

$$W_{FWC} = W_{MSM} + W_{BD} \quad (2-14)$$

W_{FWC} = 증기발생기로 공급되는 주급수유량(계산값)

W_{MSM} = 증기발생기를 떠나는 주증기유량(측정값)

W_{BD} = 증기발생기를 떠나는 취출수유량(설계값)

3) 자료출처 : 특정기술주제보고서 TR-KHNP-0017(KHNP, 2010)

2. 주증기 질량유량 측정식

주증기유량은 증기발생기 출구에 설치된 증기노즐 차압을 이용하여 계산한다. 증기노즐 역시 차압식 유량계이므로 FWBSCAL 측정식에서 적용된 것과 기본적으로 동일한 함수의 형태를 이용한다.

$$W_{MSM} = k \left(\frac{Yd^2 F_a}{\sqrt{1-\beta^4}} \right) \left(\frac{\sqrt{\Delta P_{EQ}}}{\sqrt{v_s}} \right) \times MSCF \quad (2-15)$$

W_{MSM} = 측정 주증기 질량유량

k = 단위변환 상수

Y = 유체 압축계수

d = 노즐 목 직경

F_a = 노즐 유로면적 열팽창 계수

β = 연결배관 직경(D)에 대한 노즐 목 직경의 비(=d/D)

ΔP_{EQ} = 주증기유량 측정장치(Nozzle) 차압

V_s = 주증기 비체적

$MSCF$ = 주증기유량 교정상수

국내 표준형원전은 증기발생기당 증기유로가 2개씩 설치되어 있으므로 주증기유량은 2개의 증기노즐 유량을 합하여만 하지만, 본 방법론에서는 다음의 식을 만족하는 유량차압을 구하여 적용한다.

$$\sqrt{\Delta P_{EQ}} = 2 \sqrt{\frac{\Delta P_{MS1} + \Delta P_{MS2}}{2}} = 2 \sqrt{\Delta P_{MS}} \quad (2-16)$$

ΔP_{MS1} = 증기발생기 #1 증기노즐 측정차압

ΔP_{MS2} = 증기발생기 #2 증기노즐 측정차압

$$\Delta P_{MS} = \frac{\Delta P_{MS1} + \Delta P_{MS2}}{2}$$

위 식처럼 2개의 증기노즐 측정차압의 평균값에 2배를 곱해 주는 값은 증기노즐 각자의 차압을 더해준 값보다 같거나 큰 값을 가지게 된다. 이렇게 함으로써 주증기 질량유량의 과소평가 가능성을 배제할 수 있다.

$$2\sqrt{\frac{\Delta P_{MS1} + \Delta P_{MS2}}{2}} \geq \sqrt{\Delta P_{MS1}} + \sqrt{\Delta P_{MS2}} \quad (2-17)$$

다음의 표는 식 (2-17) 계산값의 이론적인 차이를 나타내고 있다.

표 2-1 주증기유량 측정차압 결정식의 계산값 변화

차압 비(D)	적용식(A)	비교식(B)	차이(A-B)	차이(A-B)(%)
1.00	1	1	0	0
0.95	0.987421	0.98734	8.12E-05	0.008 %
0.90	0.974697	0.974342	0.000338	0.035 %
0.85	0.961769	0.960977	0.000792	0.082 %
0.80	0.948683	0.947214	0.00147	0.155 %
0.75	0.935414	0.933013	0.002402	0.257 %
0.70	0.921954	0.91833	0.003624	0.395 %
$D = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \quad A = 2\sqrt{\frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{2}} \quad B = \sqrt{\Delta P_1} + \sqrt{\Delta P_2}$				

그러므로 식 (2-15) 은 다음과 같이 변경가능하다.

$$W_{MSM} = k \left(\frac{Yd^2F_a}{\sqrt{1-\beta^4}} \right) \left(\frac{2\sqrt{\Delta P_{MS}}}{\sqrt{v_s}} \right) \times MSCF \quad (2-18)$$

즉, 주증기유량(W_{MSM})은 다음의 함수로 나타낼 수 있다.

$$W_{MSM} = f(Y, d, F_a, D, \Delta P_{MS}, V_s, MSCF) \quad (2-19)$$

식 (2-18) 에 포함된 비체적(V_s), 유로면적 열팽창계수(F_a), 압축계수(Y)를 계산하는데 필요한 증기압력은 안전채널 증기압력을 직접 이용한 중앙평균 압력을 이용한다.

$$MSGP = \frac{\sum_{i=1}^4 MSG_i - \min(MSG_i) - \max(MSG_i)}{2} \quad (2-20)$$

- MSGP = 측정 중앙평균 증기압력 (= SGP)
- MSG_i = 안전채널 측정 증기압력 (증기발생기 당 4개)
- $\min(MSG_i)$ = 안전채널 측정압력 중 최소값
- $\max(MSG_i)$ = 안전채널 측정압력 중 최대값

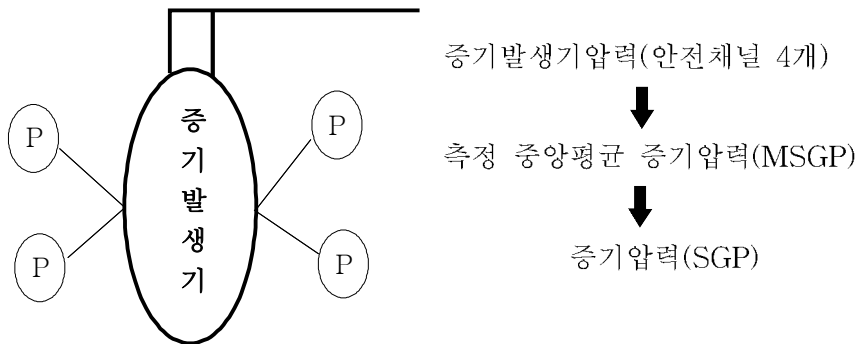


그림 2-3 증기압력 결정

유로면적 열팽창계수(F_a)는 증기온도의 일차함수로 근사된 다음의 식을 이용한다. 이는 증기발생기 운전온도 대부분의 영역에서 계수의 값이 온도에 따라 거의 선형적으로 변하기 때문이다.

$$F_a = 0.9982 + 2.0 \times 10^{-5} T_{\text{sat}} \quad (2-21)$$

T_{sat} = 주증기 포화온도(°F)

증기압축계수 (Y)는 과냉각상태의 주급수와는 달리 압축성이 존재하므로 다음과 같은 식을 적용한다.

$$Y = \sqrt{r^{2/\gamma} \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{1-r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{1-r} \frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 r^{2/\gamma}}} \quad (2-22)$$

Y = 증기압축계수

γ = 주증기 정적비열과 정압비열의 비

β = 증기노즐의 목과 연결배관 내경의 비

r = 증기노즐 목 부위 압력 비

$$r = \frac{P_T}{SGP} = \frac{SGP - \Delta P_{MS}}{SGP} \quad (2-23)$$

P_T = 주증기노즐 목 부위 압력

ΔP_{MS} = 주증기유량 측정차압의 평균

SGP = 증기발생기 압력

정적비열과 정압비열의 비 γ 는 다음 식을 적용한다.

$$\gamma = 1.20625 + 0.2X - 0.000625 \times T_{\text{sat}} \quad (2-24)$$

T_{sat} = 주증기 포화온도(°F)

X = 증기 건도

따라서 식 (2-19)은 다음의 함수로 나타낼 수 있다.

$$W_{MSM} = f(d, D, \Delta P_{MS}, MSGP, MSCF) \quad (2-25)$$

주증기유량 교정상수(Main Steam Calibration Factor: MSCF)는 이론적으로 유량측정장치의 방출계수에 해당한다. 증기발생기에 설치되어 있는 증기노즐의 경우 이 값을 실험실 조건에서 정확하게 측정할 수 있는 방법이 없다. 기본적으로 취출수가 차단된 조건에서는 증기발생기로 공급되는 주급수유량과 증기발생기에서 배출되는 주증기유량은 동일하다. 따라서 매 주기 초 이와 같은 운전조건에서 FWBSCAL 증기질량유량과 MSBSCAL 증기질량유량을 취득하여 교정하여 줌으로서 새로운 주증기유량 교정상수를 결정하도록 한다.

교정상수 취득 시험조건

- 매 주기 초 주급수관 벤츄리 Fouling 진행 이전
- 100 % 출력운전
- 증기발생기 취출수 차단
- 최소 3시간 동안 자료 취득

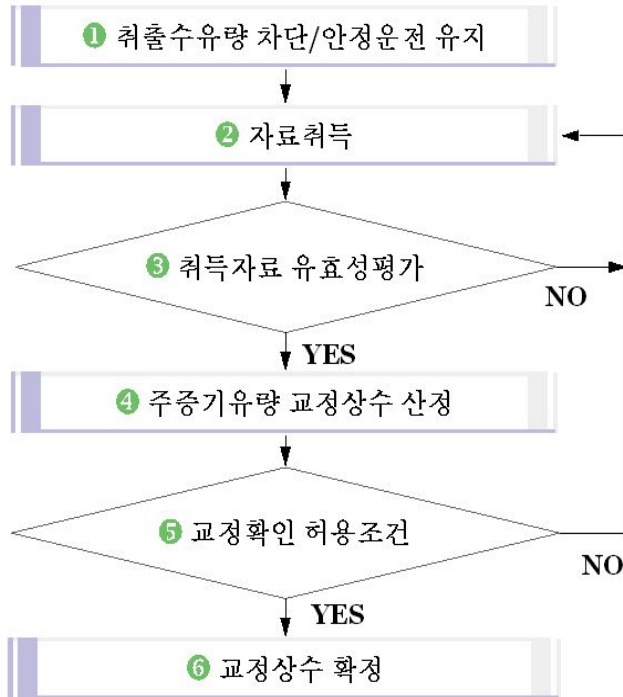


그림 2-4 주증기유량 교정상수 결정

$$MSCF_{NEW} = \frac{W_{FW}}{W_{MS}/MSCF_{OLD}} \quad (2-26)$$

$MSCF_{NEW}$ = 새로 결정된 주증기유량 교정상수

$MSCF_{OLD}$ = 이전의 주증기유량 교정상수

W_{FW} = FWBSCAL 방법론에 의한 주증수 질량유량

W_{MS} = MSBSCAL 방법론에 의한 주증기 질량유량

3. 주증기유량 기반 원자로열출력(MSBSCAL) 측정식

MSBSCAL 방법론에서는 FWBSCAL 방법론과는 달리 주증기유량은 측정된 값을 이용하고 주증기유량은 유량평형식에서 계산된 값을 이용한다.

$$Q_{MS} = W_{MSM}h_{MS} + W_{BD}h_{BD} - W_{FW}h_{FW} \quad (2-27)$$

식 (2-27)의 열평형식을 유량평형식을 이용하여 측정 또는 상수입력 변수로 구성된 식으로 표현하면 다음과 같은 식으로 변환된다.

$$Q_{MS} = W_{MSM}(h_{MS} - h_{FW}) + W_{BD}(h_{BD} - h_{FW}) \quad (2-28)$$

위 식 (2-28)에서 주증기엔탈피(h_{MS}) 및 취출수엔탈피(h_{BD})는 다음과 같다.

$$h_{MS} = Xh_g + (1-X)h_f \quad (2-29)$$

$$h_{BD} = X_{BD}h_g + (1-X_{BD})h_f \quad (2-30)$$

X = 주증기의 건도

X_{BD} = 취출수의 건도

h_g = 증기발생기 압력에서의 포화증기 엔탈피

h_f = 증기발생기 압력에서의 포화액체 엔탈피

위 식에서 엔탈피를 결정하기 위해 필요한 증기압력(PSG)은 FWBSCAL 방법론에서 적용하는 식 (2-11)과 동일하다.

$$PSG = PSEC + p + q \cdot \Delta P_{MSS} \quad (2-31)$$

PSG = 증기발생기 압력

PSEC = 주증기모관 측정압력

ΔP_{MSS} = 주증기유량 측정차압(미리 선택된 증기발생기 출구 Nozzle 차압)

p, q = 출력상승시험 시 결정되는 상수

즉, 식 (2-28)의 주증기유량 기반 원자로열출력(Q_{MS}) 추정식은 다음의 함수로 나타낼 수 있다.

$$Q_{MS} = f(W_{MSM}, W_{BD}, FWP, FWT, PSG, X, X_{BD}) \quad (2-32)$$

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

$$MSBSCAL = Q_{MS1} + Q_{MS2} + EL - EC \quad (2-33)$$

Q_{MS1} = 증기발생기 #1 열출력

Q_{MS2} = 증기발생기 #2 열출력

EL = 제어체적으로부터의 에너지 손실

EC = 제어체적으로부터의 에너지 입력

제 3 절 COLSS 기준출력 선택 알고리즘

COLSS에서는 발전소 기준출력을 선택하기 위하여 일차측열출력(BDELТ), 이차측열출력(BSCAL) 및 터빈출력(BTFSP)을 독립적으로 계산한다.

1. 일차측열출력(BDELТ) 계산

일차측열출력은 1초에 한번씩 수행된다. 계산에 사용되는 입력변수는 다음과 같다.

- 고온관 온도
- 저온관 온도
- 가압기 압력
- 원자로냉각재 질량유량

이들 변수를 이용하여 일차측열출력(BDELТ)을 다음과 같이 계산한다.

$$BDELТ = ((BSTAT + E5 * BDYN) - E6) * E7 \quad (2-34)$$

BSTAT = 정적 일차측열출력
 BDYN = 동적 일차측열출력
 E5, E6, E7 = 교정상수

일차측열출력(BDELТ)은 정상상태에서 이차측열출력(BSCAL)과 일치되도록 교정된 열출력(CBDELТ)을 계산하는데 사용된다.

$$H1 = E8 / (1.0 + E9 * ABS(BDELТ + CDP - BSCAL)) \quad (2-35)$$

$$CD = CDP - H1 * (BDELТ + CDP - BSCAL)$$

$$CBDELТ = BDELТ + CD$$

H1 = 출력에 대한 교정이득
 E8, E9 = 상수
 CD = 교정항의 현재 값
 CDP = 교정항의 과거 값

2. 터빈출력(BTFSP) 계산

터빈출력은 고압터빈 1단 압력의 함수로 결정된다. 일차측열출력(BDELТ)과 마찬가지로 COLSS에서 연속적으로 이차측열출력(BSCAL)에 자동으로 교정된다.

$$BTFSP = G1 + G2 * TFSP + G3 * TFSP^2 + G4 * TFSP^3 \quad (2-36)$$

TFSP = 터빈 1단 압력
 G1~G4 = 교정상수

교정된 터빈출력(CBTFSP)의 계산은 다음과 같다.

$$H2 = G5 / (1.0 + G6 * ABS(BTFSP + CTP - BSCAL)) \quad (2-37)$$

$$CT = CTP - H2 * (BTFSP + CTP - BSCAL)$$

$$CBTFSP = BTFSP + CT$$

H2 = 여과된 출력에 대한 교정이득

G5, G6 = 상수

CT = 교정항의 현재 값

CTP = 교정항의 과거 값

3. 발전소 기준출력 선택

이전까지 영광원자력 3,4호기에서는 교정된 일차측열출력(CBDELTA)과 터빈출력(CBTFSP) 중에서 큰 값을 발전소출력(PP)으로 결정하였다. 하지만 일차측열출력의 과도한 잡음신호로 인해 노심출력이 보수적으로 평가되는 운전상의 문제점을 극복하고자 이차측열출력(BSCAL)만을 발전소 기준출력으로 결정하도록 설계변경 하였다. 이에 따라 BSCAL Quality가 “GOOD”일 경우 발전소 기준출력은 BSCAL 출력이 되고, BSCAL Quality가 “BAD”일 경우 발전소 기준출력은 기존의 방법처럼 CBDELTA 와 CBTFSP 중 큰 값이 선택되어진다.

BSCAL Quality가 “GOOD”일 경우 BSCAL 출력은 다시 FWBSCAL과 MSBSCAL 중 하나가 선택되어야 하는데 100% 출력운전 중에는 MSBSCAL이 선택되도록 설계되었다.

MSBSCAL이 기준출력으로 선택되는 경우는 다음의 조건이 모두 만족되어야 한다.

- MSBSCAL 선택스위치 SET (OPMS = SET)
- 출력 $\geq 95\%$
- MSBSCAL Quality = "GOOD"

MSBSCAL 적용운전 중 다음 어느 하나의 조건에 해당될 경우 COLSS는 자동으로 FWBSCAL 운전으로 자동 복귀된다.

- MSBSCAL 선택스위치 RESET (OPMS = RESET)
- 출력 $< 95\%$
- MSBSCAL Quality = "BAD"

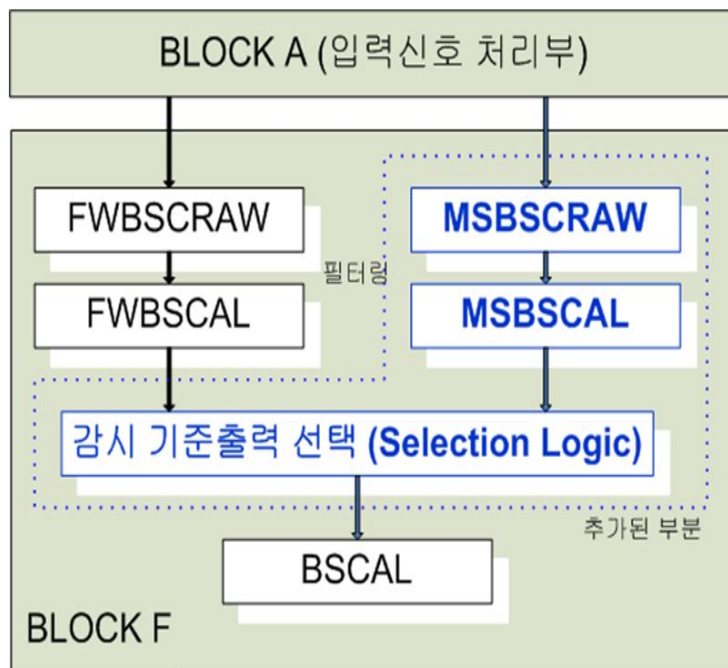


그림 2-5 원자로열출력 선택 개념

POINT ID	DESCRIPTION	VALUE	UNITS
CIJXBAUG	BSCAL AVERAGE	96.76	PCT
CIJXPPFS	FILTERED PLANT POWER- SMOOTHED	96.08	PCT
CIJXPPF	FILTERED PLANT POWER- UNSMOOTHED	96.01	PCT
CIJXPPS	PLANT POWER - SMOOTHED	96.13	PCT
CIJXPP	PLANT POWER - UNSMOOTHED	96.35	PCT
CIJXMARG	MARGIN TO POWER OPERATING LIMIT	3.24	PCT
CIJXDILT	DELTA T POWER - CALIBRATED	96.35	PCT
CIJXBDLT	DELTA T POWER - UNCALIBRATED	96.47	PCT
CIJXCSTF	TURBINE POWER - CALIBRATED	96.01	PCT
CIJXCSTFS	TURBINE POWER - UNCALIBRATED	96.17	PCT
CIJXBSCAL	SECONDARY CALORIMETRIC POWER	95.71	PCT
CIJXFMBL	FW-BASED BSCAL	95.71	PCT
CIJXMSBL	MS-BASED BSCAL	97.00	PCT
CIJXDNBS	DNBR PWR OPER LIMIT- SMOOTHED	123.37	PCT
CIJXDNBB	DNBR PWR OPER LIMIT- UNSMOOTHED	123.29	PCT
CIJXKMP	KW/FT PWR OPER LIMIT- SMOOTHED	112.17	PCT
CIJXKMPF	KW/FT PWR OPER LIMIT- UNSMOOTHED	112.19	PCT
CIYXAZT	AZIMUTHAL TILT	.238935E-01	NO UNIT
CIYKTL3	AZIMUTHAL TILT W/ TECH SPEC	0.1E+00	NO UNIT
CIYKTL2	AZIMUTHAL TILT W/ CPC LIMITS	0.4E-01	NO UNIT
CIYKASI	AXIAL SHAPE INDEX	-1.824E-01	NO UNIT
CIYKASIL	AXIAL SHAPE INDEX W/ LO LIMIT	-0.27E+00	NO UNIT
CIYKASIH	AXIAL SHAPE INDEX W/ HI LIMIT	0.25E+00	NO UNIT
CIKTH1A	LICENSED PWR LIMIT - EVENT TIME	0.00	MIN
CIKTH1AA	LICENSED PWR LIMIT - ANNUAL TIME	72.49	MIN
CIKTH1B	DNBR POWER LIMIT - EVENT TIME	0.00	MIN
CIKTH1BA	DNBR POWER LIMIT - ANNUAL TIME	0.00	MIN
CIKTH1C	KW/FT POWER LIMIT - EVENT TIME	0.00	MIN
CIKTH1CA	KW/FT POWER LIMIT - ANNUAL TIME	0.00	MIN

RESS **ESCAPE** FOR LAST DISPLAY.

NEW ALARM

NEW ALARM

POINT ID	DESCRIPTION	VALUE	UNITS
PRIMARY LOOP DATA			
CITXTC1	COLD LEG #1 - SELECTED TEMP	293.1	DEG C
CITXTC2	COLD LEG #2 - SELECTED TEMP	293.3	DEG C
CITXTC3	COLD LEG #3 - SELECTED TEMP	292.1	DEG C
CITXTC4	COLD LEG #4 - SELECTED TEMP	293.7	DEG C
CITXTH1	HOT LEG #1 - SELECTED TEMP	323.5	DEG C
CITXTH2	HOT LEG #2 - SELECTED TEMP	323.6	DEG C
CIPXPRI	PRESSURIZER - SELECTED PRESSURE	156.8	KG/CM2A
SECONDARY LOOP DATA			
CIPXPSC1	STEAM GENERATOR #1 - HEAD PRESS	.72078E+02	KG/CM2A
CIPXPSC2	STEAM GENERATOR #2 - HEAD PRESS	.71873E+02	KG/CM2A
CITXFMT1	FEED WATER #1 - TEMPERATURE	234.7	DEG C
CITXFMT2	FEED WATER #2 - TEMPERATURE	235.2	DEG C
CIFXSMF1	FW-BASED SG #1 STEAM MASS FLOW	.29879E+07	KG/HR
CIFXSMF2	FW-BASED SG #2 STEAM MASS FLOW	0.2886E+07	KG/HR
CIFXFMW1	FW-BASED SG #1 FW MASS FLOW	.29324E+07	KG/HR
CIFXFMW2	FW-BASED SG #2 FW MASS FLOW	.29105E+07	KG/HR
CIJXEG1	FW-BASED SG #1 POWER OUTPUT	.12187E+10	KCAL/HR
CIJXEG2	FW-BASED SG #2 POWER OUTPUT	.12082E+10	KCAL/HR
CIFXSMW1	MS-BASED SG #1 STEAM MASS FLOW	.29705E+07	KG/HR
CIFXSMW2	MS-BASED SG #2 STEAM MASS FLOW	.29629E+07	KG/HR
CIJXMSE1	MS-BASED SG #1 POWER OUTPUT	0.1245E+10	KCAL/HR
CIJXMSE2	MS-BASED SG #2 POWER OUTPUT	.12404E+10	KCAL/HR

19-11-09 DETAIL PRINT STARTED
19-11-09 DETAILED PRINT ON PR

NEW ALARM

NEW ALARM

그림 2-6 영광3,4호기 COLSS 열출력 화면

제 3 장 열출력측정 신뢰도 평가

제 1 절 불확실도(Uncertainty)

표준원전 인허가출력 제한치 감시는 BSCAL 출력이 안전해석상 초기 설정치인 102%를 초과하지 않음으로서 보증되어진다. 현재 영광3,4호기 인허가출력 제한치 초과경보는 BSCAL 순시출력 기준 100.5%를 초과할 때 발생되는데 이는 BSCAL 출력측정에 있어 불확실도 1.5%를 고려한 값이다. 즉 FWBSCAL, MSBSCAL 출력 측정 불확실도가 1.5% 미만이면 만족한 것으로 본다. 영광 3,4호기 원자로열출력 불확실도 계산에 고려된 인자들은 다음과 같다. 인용된 FWBSCAL 불확실도 관련 자료는 2002년도 과학기술부에서 발간된 “가동원전 엔지니어링서비스 기술개발” 보고서에서 발췌하였으며, MSBSCAL 관련자료는 2010년도 KHNP 특정기술주제보고서 “TR-KHNP-0017”에서 발췌하였다. 불확실도 계산의 결과 값은 100% 출력 운전조건에서 비정상 취출수유량(63.72 klbm/hr)이 흐르는 조건을 가정하였다. 이는 정상 취출수유량(12.6 klbm/hr)보다 불확실도 값이 더 크고, Hi capacity 취출수유량(63.72 klbm/hr) 운전은 국내 모든 발전소에서 거의 시행하고 있지 않기 때문이다.

1. 불확실도 고려인자⁴⁾

가. 주급수 온도(FWT)

주급수온도가 변하면 주급수의 엔탈피 및 주급수유량식의 열팽창계수와 비체적이 변한다. 주급수 엔탈피는 FWBSCAL, MSBSCAL 불확실도 계산에 직접적으로 영향을 미친다. 열팽창계수와 비체적의 변화는 주급수유량을 변화시킨다. 주급수유량은 FWBSCAL 계산에 매우 중요한 인자이므로 결과적으로 FWBSCAL 불확실도는 주급수온도 불확실도에 상당히 민감함을 알 수 있다. 계산에 사용된 주급수온도 불확실도는 FWBSCAL이 ‘3.89°F’, MSBSCAL이 ‘5.4°F’이다.

4) 자료출처: 가동원전 엔지니어링서비스 기술개발(과학기술부, 2002)
특정기술주제보고서 TR-KHNP-0017(KHNP, 2010)

나. 주급수 압력(FWP)

주급수압력은 직접적으로 증기발생기에서 측정하지 않고 주증기모관 압력을 측정하여 이를 바탕으로 간접적으로 계산하며 전체 불확실도에 미치는 영향은 미미하다. 이는 주급수압력 변화에 따른 주급수의 엔탈피 및 비체적의 변화량이 크지 않다는 열역학적인 특성에 기인한다. MSBSCAL 계산에서 불확실도는 '60 psi'를 적용하였다. FWBSCAL 계산에 사용된 불확실도는 '250 psi'인데, 이는 실제 불확실도에 비해 매우 큰 값이다. 하지만 실제 FWBSCAL 불확실도에 미치는 영향 그리 크지 않다.

다. 열출력계산에서의 증기압력(PSG)

FWBSCAL, MSBSCAL 증기엔탈피 계산에 필요한 증기압력 역시 주증기모관 압력을 측정하여 이를 바탕으로 간접적으로 계산한다. 따라서 주증기모관압력 불확실도보다 큰 값인 '50 psi'를 보수적으로 적용한다.

라. 주증기 건도

계산에 사용된 주증기건도의 불확실도 '0.0025'는 가정할 수 있는 가장 보수적인 값이지만 전체 불확실도 계산에 미치는 영향은 미미하다.

마. 증기발생기 취출수유량 및 건도

열출력계산에 사용되는 취출수유량은 측정값이 아니고 설계되어진 값을 적용한다. 따라서 정상 취출수 조건에서 설계유량의 50%를 불확실도로 가정한다. 또한 증기발생기 취출수의 상태는 원자로냉각재 저온관 쪽에서는 약간의 과냉각 또는 포화액체 상태일 것이고, 고온관 쪽에서는 증기를 약간 포함한 포화액체 상태일 것이므로 취출수의 건도를 정량적으로 계산하거나 측정하기는 매우 어렵다. 설계 자료에 의하면 취출수 건도가 정상 또는 비정상 취출의 경우 약 '2 ~ 8 %'로 나타나고 있다. 그러나 이 값이 불확실도에 미치는 영향은 무시할만한 수준이므로 취출수 건도의 불확실도는 '0'으로 설정하여 계산한다.

바. 순 에너지 유입량

순 에너지 유입량 역시 정량적으로 계산하기에는 매우 복잡하다. 따라서 보수적인 값인 '50%'을 적용한다.

사. 주급수 벤츄리 차압

주급수 벤츄리 차압은 FWBSCAL 계산에만 이용된다. FWBSCAL 출력측정에 있어 벤츄리 차압측정 불확실도의 영향은 매우 크다. 영광3,4호기 불확실도 계산에 입력된 값은 '9.3 inH₂O' 인데 이는 차압측정에 쓰이는 계기의 정밀도에 의해 결정된다.

아. 주급수 벤츄리 배관직경, throat 직경

FWBSCAL 계산에만 적용된 주급수 벤츄리의 배관 및 Throat 직경 불확실도는 각각 '0.01 inch' 및 '0.005 inch' 으로서 이는 벤츄리 제작자가 제공한 값이다.

자. 주급수 벤츄리 방출계수

주급수벤츄리 방출계수는 FWBSCAL 주급수유량 계산에 쓰이는 주요 입력자료 중의 하나로서 FWBSCAL 불확실도에 상당한 영향을 미친다. 계산에 사용된 불확실도 '0.25%'는 벤츄리 제작자가 제공하는 값이다.

차. 증기유량 측정차압

증기발생기 출구노즐에서 측정하는 차압은 MSBSCAL 증기질량유량 계산에 사용된다. 측정채널 전체의 불확실도는 '0.97 psi' 이다.

카. 증기발생기 안전채널 압력(MSG)

MSBSCAL에 사용되는 증기비체적은 증기발생기당 4개의 안전채널 압력을 이용해 계산한다. 측정채널 전체의 불확실도는 '17.94 psi' 이다.

타. 증기유량교정상수(MSCF)

MSBSCAL을 FWBSCAL에 의한 교정작업 수행 시 적용하는 증기유량교정상수(MSCF)의 불확실도 입력 값은 '0.87%' 이다.

표 3-1 100% 출력조건에서 원자로열출력 계산인자들의 불확실도

인 자	이 름	불확실도(2σ 기준)	
		FWBSCAL	MSBSCAL
C _d	벤츄리 방출계수	0.25 %	-
d	벤츄리 throat 직경	0.005 inch	-
D	벤츄리 배관 직경	0.01 inch	-
DP _{FW}	벤츄리 차압	9.3 inH ₂ O	-
FWT	주급수 온도	3.89 °F	5.4 °F
FWP	주급수 압력	250 psi	60 psi
PSG	증기 압력	50 psi	50 psi
X	주증기 건도	0.0025	0.0025
X _{BD}	취출수 건도	0	0
NET	순 에너지 유입량	8.5 MW	8.5 MW
ΔP _{MS}	증기유량 측정차압	-	0.97 psi
MSG	증기발생기 안전채널 압력	-	17.94 psi
MSCF	증기유량 교정상수	-	0.87 %

2. 불확실도 평가결과

영광3,4호기 100% 출력운전, 비정상 취출수유량 조건에서 각 입력변수들의 불확실도를 종합하여 평가한 결과 FWBSCAL이 0.969%, MSBSCAL이 1.34%로 인허가출력 제한기준인 1.5%를 모두 만족하였다. 이에 따라 벤츄리 Fouling 현상에 따른 실제 원자로열출력 감소를 방지하고자 도입한 MSBSCAL의 설계는 타당하다 하겠다.

제 2 절 신뢰도 영향인자

FWBSCAL, MSBSCAL 열출력측정 신뢰도에 영향을 미치는 주요 인자로서는 주급수유량, 주급수온도, 증기발생기 압력 등이 있다, 증기발생기 출구노즐 차압과 주증기모관 압력 계측기는 열출력 측정오차 발생요인 중 하나이나 아직까지 경험해본 발전소가 많지 않다. 또한 증기발생기 취출수유량과 원자로냉각재계통으로부터의 순에너지 효과는 열출력계산에 미치는 영향이 비교적 크지만 설계값을 적용하기 때문에 열출력 계산에 있어 변화요인으로 작용하지는 않는다. 이에 이들 주요인자들을 중심으로 열출력계산에 미치는 영향 및 산업계 경험 등을 살펴보고자 한다.

1. 급수관 벤츄리 Fouling

급수관 벤츄리 Fouling은 FWBSCAL 측정신뢰도에 가장 큰 영향인자이다. Fouling이 발생할 경우 벤츄리에서 측정되는 급수유량은 많은 것처럼 지시되어 FWBSCAL 은 과대평가되고, 반대로 De-Fouling이 발생할 경우 급수유량이 적은 것처럼 지시되어 FWBSCAL은 과소평가된다. FWBSCAL이 과대평가되면 원자로운전원은 인허가출력을 넘기지 않기 위하여 원자로출력을 이전보다 낮은 수준으로 유지하게 됨으로서 경제성에 손실을 미친다. FWBSCAL이 과소평가될 경우 원자로운전원은 출력증발을 하게 되고 실제 원자로열출력이 인허가출력 제한치 이상으로 초과될 가능성이 있다.

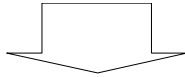
- ※ Fouling : 급수관 벤츄리 목(throat) 부분에서 압력이 감소하고 유속이 빨라 지므로 급수에 포함된 부식생성물이 목 부분과 감지기 Tap에 침적하는 현상으로 부식생성물이 침적되면 목 부분의 단면적이 줄어 실제 유량보다 높게 지시하는 효과를 준다.
- ※ De-Fouling : 원자로 정지나 출력 급속감발 또는 급수속도 감소 시 급수의 PH가 증가하여 벤츄리 목의 부식생성물에 대한 친화력을 감소시켜 목 부분에 침착되어있던 이물질이 탈착되는 현상을 말한다.

가. Fouling에 의한 영향

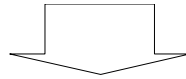
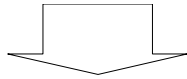
Fouling이 발생하면 앞에서 기술된 바와 같이 FWBSCAL은 과대평가되고 실제 원자로 출력은 감소하게 된다. 실제 원자로출력이 감소함으로써 원자로 냉각재 온도가 감소하고, 증기발생기에서 배출되는 증기유량과 터빈에 유입되는 증기유량의 감소를 유발함으로써 결국은 발전기출력이 감소하게 된다.

Fouling에 의한 원자로출력 감소효과는 그 양이 크지 않고 서서히 발생하므로 그 현상을 발견하기 쉽지 않다. 또한 Fouling 이외에도 증기누설, 복수기진공 등 출력에 기여하는 인자가 많이 있어 운전원의 세심한 주의가 요구된다.

벤츄리에 이물질 축적으로 급수유량이 실제보다 높게 측정

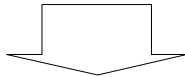


FWBSCAL 계산값(↑), 실제 원자로 출력(↓)
FWBSCAL(↑) = 급수유량(↑) × (증기 엔탈피 - 급수 엔탈피)



- 일차측 거동
- 저온관온도 (↓)
 - Tavg (↓)
 - RCS ΔT (↓)

- 이차측 거동
- 증기유량 (↓)
 - 터빈1단 압력 (↓)
 - 주급수온도 (↓)



발전기 출력 감소

그림 3-1 벤츄리 Fouling 발생 시 증상

나. Fouling 발생사례⁵⁾

(1) Virgil C. Summer Nuclear Station (2002.06)

2002년 11월 6일 10:00경, 원자로운전원은 이차측열출력 지시 값이 증가하고 있음을 인지하였다. 출력은 총 6~10 MWe 증가한 것으로 지시하였다. 화학부에서는 그 때 증기발생기 양이온전도도가 정상치보다 증가했음을 보고하였고 발전소는 취출수 탈염수지 세정(Rinsing)작업을 수행 중이었다. 이 탈염수지는 최근에 새 수지가 150 ft³ 주입된 것이다. 수지 세정(Rinsing)으로 인해 어떤 취출수 화학성분이 주북수기, 복수 및 급수 계통, 궁극적으로 증기 발생기로 유입 되었을 가능성이 있었다. 기술부서에서는 측정된 급수 유량이 급수 유량 벤츄리의 Fouling 현상 징후를 보이며 증가했음을 보고하였다. 이는 실제적인 출력 증가 없이 계산된 출력의 증가만을 야기 시켰다.

(2) Vermont Yankee Nuclear Power(2001.08)

01년 8월 21일, 원자로 출력 100% 일 때 System Engineer는 2001년 8월 17일부터 8월 21일의 기간 동안에 계산프로그램에 의해 계산된 정격열출력이 3.5 MWth 낮음을 발견하였다. 이는 실제 원자로출력이 높게 유지되고 있음을 의미한다. 이에 따라 급수유량 보정작업이 이루어졌다. 급수유량의 보정은 출력을 65%로 낮춘 후 교류 초음파 유량 측정기를 이용해 행하여졌고, 급수유량은 실제 유량보다 0.22% 적게 지시하고 있었다. 유량노즐의 새로운 보정 값이 컴퓨터에 입력되어 100% 정격 열출력으로 복귀하였다.

5) 자료출처: INPO/KHNP Operating Experience

(3) 영광원자력 5호기 (2006.06)

2006 .06 영광원자력 5호기가 주기 초 대비 전기출력이 약 10 MW 감소되어 원인분석 결과 벤츄리 이물질 침착으로 BSCAL 계산출력이 과대평가된 것으로 나타났다. 변수추세 분석결과 BSCAL 계산출력은 일정한 반면 발전기출력, 증기유량, HP TBN⁶⁾ 1단 압력은 감소추세를 나타내고 있는데 이는 급수관 벤츄리에 Fouling이 발생되었음을 의미한다.

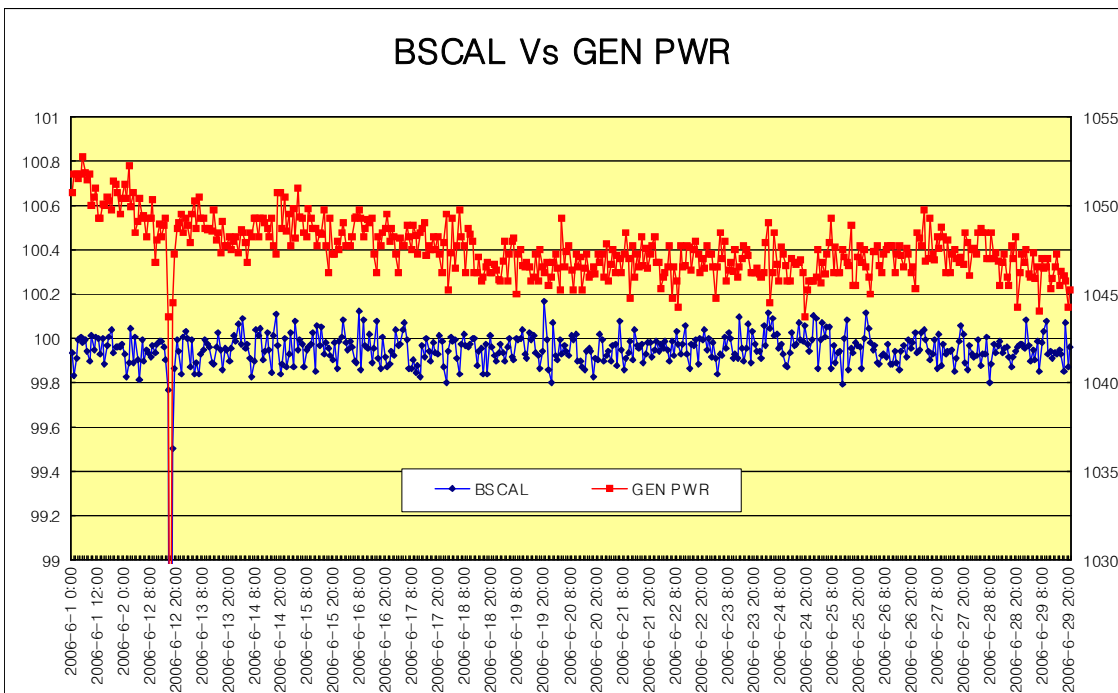


그림 3-2 2006년도 영광5호기 Fouling 발생경험(발전기출력 감소)

6) HP TBN : 고압터빈(High Pressure Turbine)

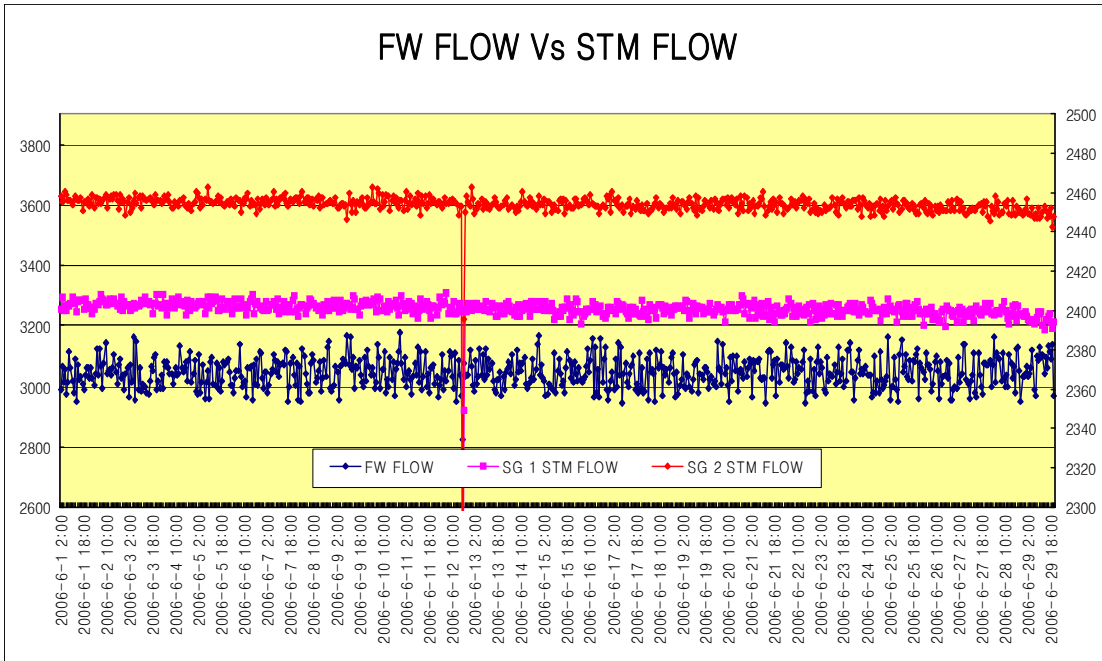


그림 3-3 2006년도 영광5호기 Fouling 발생경험(증기유량 감소)

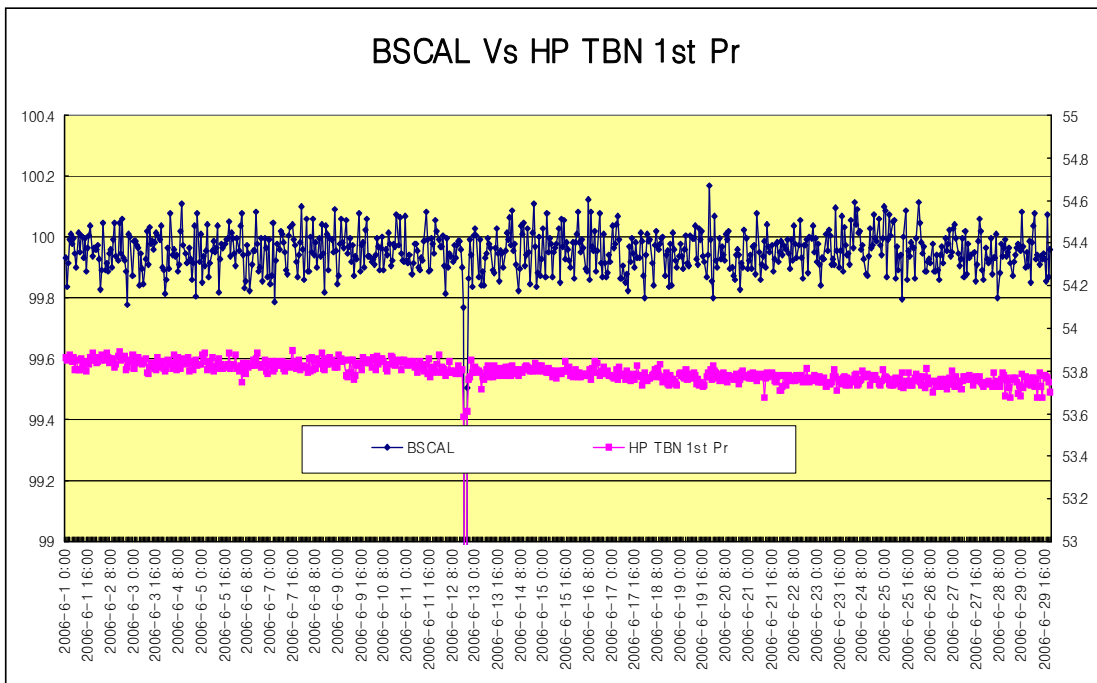


그림 3-4 2006년도 영광5호기 Fouling 발생경험(HP TBN 1단 압력 감소)

(4) 영광원자력 4호기 (2010.09)

2010년 9월 영광4호기에서 주급수유량 기반의 원자로열출력(FWBSCAL) 지시값이 증가하고 있음에도 주증기유량 기반의 원자로열출력(MSBSCAL) 지시값 및 고압터빈 1단 압력 지시값이 일정함이 관찰되었다. 관련된 운전변수 분석결과 주급수관 벤츄리에 Fouling 현상이 발생하고 있음으로 평가되었다. 하지만 영광4호기는 발전소 기준출력으로 주증기유량 기반의 원자로열출력(MSBSCAL)을 선택하여 운전 중이었으므로 실제 전기출력의 감소는 동반되지 않았다.

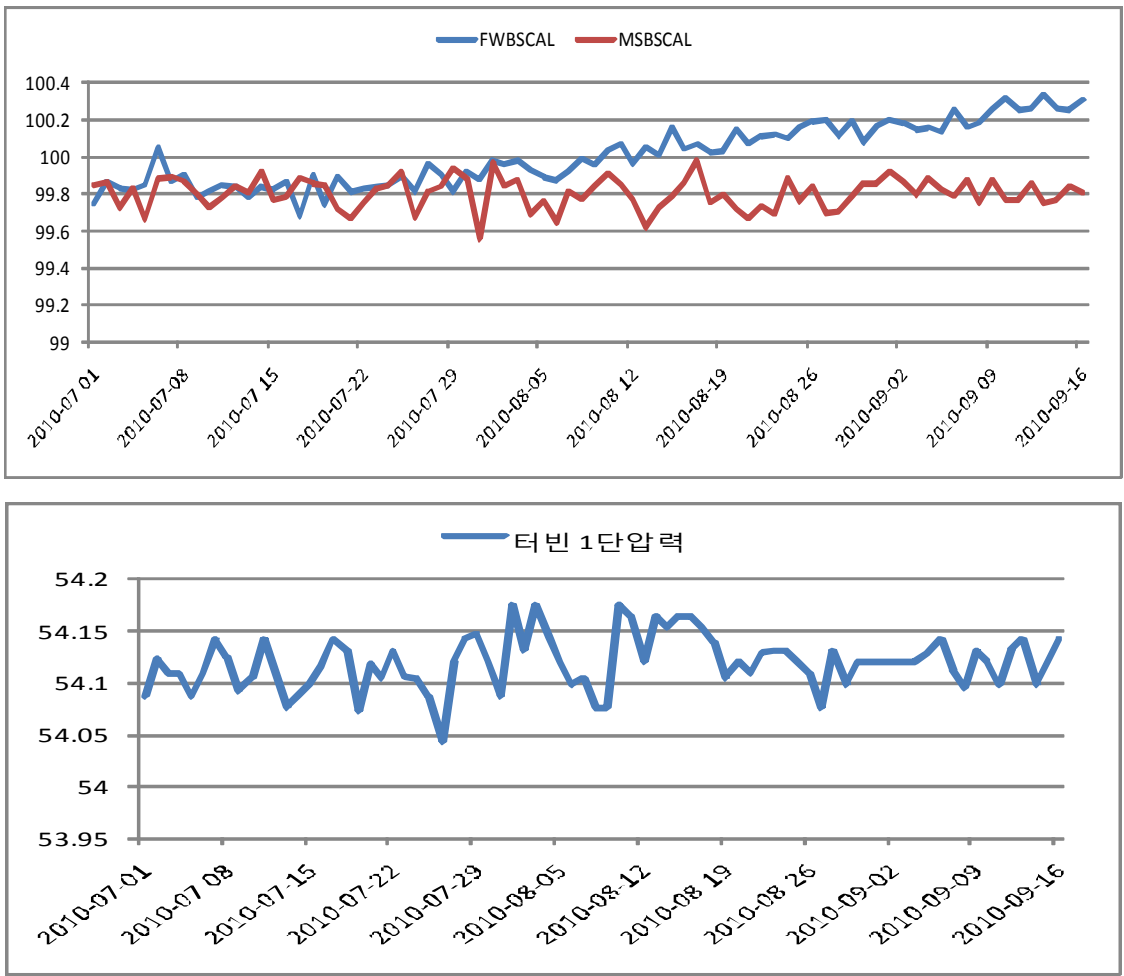


그림 3-5 2010년도 영광4호기 MSBSCAL/FWBSCAL 변화추이

2. 주급수 온도

주급수온도는 측온저항체(RTD: Resistance Temperature Detector)를 이용하여 측정한다. 원리는 금속의 전기저항이 온도변화에 따라 변함을 이용한 것인데 온도가 올라가면 저항 값은 증가하게 된다. 측온저항체의 소선재료로는 백금, 동, 니켈 등이 있다. 이중 백금선이 온도의 변화에 따라 저항 값이 예민하여 온도를 정확하게 측정할 수 있고 안정성이 우수하여 가장 많이 사용하고 있다. 온도측정에 있어 오차를 발생시키는 요인으로는 계측기 측정 Loop의 오차, 또는 Drift (진동, 열적영향 등 계측기 주변영향으로 인한 소자특성이 변화)가 있다.

주급수온도의 변화는 주급수 엔탈피(h_{FW})의 변화를 뜻한다. 즉,

식 (2-8) 의 $Q_{FW} = W_{FWM}(h_{MS} - h_{FW}) - W_{BD}(h_{MS} - h_{BD})$ 과,

식 (2-28)의 $Q_{MS} = W_{MSM}(h_{MS} - h_{FW}) + W_{BD}(h_{BD} - h_{FW})$ 에서

FWBSCAL 출력계산과 MSBSCAL 출력계산에 모두의 변동을 야기한다. 즉, 온도가 낮게 지시하면 엔탈피가 감소한 것과 같으므로 FWBSCAL, MSBSCAL 모두 실제보다 높게 지시하게 된다. 이렇게 되면 운전원은 출력을 감발해야 하므로 경제적인 손실을 입게 된다. 반대로 온도가 실제보다 높게 지시하면 반대의 현상이 발생한다.

2001년 울진3호기에서는 계획예방정비기간에 주급수 온도센서 및 접촉부 청소를 실시함으로써 주급수온도가 약 0.4°C 상승함을 경험⁷⁾하였다. 특히 주급수온도 센서는 측온저항체를 이용한 Type으로 배관에 설치된 Well 내부에 센서가 설치되어 온도를 벽면을 사이에 두고 간접 측정하고 있다. 만약 Well 내부가 더럽혀지면 정확한 온도측정이 이루어지지 않을 수 있다.

7) 삼척대학교 산업대학원 논문집 “원자력 발전소 주급수 온도가 열출력에 미치는 영향에 관한 연구”(2002, 강영철)

3. 증기발생기 압력(안전채널)

열출력 추정식에 필요한 증기엔탈피를 구하기 위해서는 주증기모관에 설치된 압력계를 이용하는데 이것은 FWBSCAL, MSBSCAL 2가지 다 같은 압력계를 이용한다. 하지만 MSBSCAL 증기질량유량을 계산하는데 필요한 증기압력은 증기발생기에 설치된 안전채널 압력계를 이용한다.

즉 MSBSCAL 증기질량유량을 추정하는 식 (2-12)

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

증기의 비체적(v_s), 열팽창계수(F_a), 압축계수(Y)를 계산하는데 필요한 증기압력으로 증기발생기 안전채널 증기압력을 이용한다. 증기압력이 높게 지시될 경우 증기의 비체적은 감소하고 열팽창계수(포화온도에 비례)는 증가한다. 또한 압축계수는 증기압력이 올라갈수록 커지므로 역시 증가한다. 따라서 위 식에서 증기질량유량이 증가하여 MSBSCAL은 실제보다 높게 지시하게 된다.

표 3-2 포화증기 표

絶对압 력 p kg/cm ² a	포화증기 온 도 °C	열 수 비용적 m ³ /kg	포화증기 비체적 m ³ /kg	열 수 엔탈피 kcal/kg	포화증기 엔탈피 kcal/kg	증 기 잠 열 kcal/kg	열 수 엔트로피 kcal/kg °C	포화증기 엔트로피 kcal/kg °C
1.0	99.09	0.0010428	1.725	99.12	638.5	539.4	0.3096	1.7587
1.1	101.76	0.0010449	1.578	101.81	639.4	537.6	0.3168	1.7510
1.2	104.25	0.0010468	1.455	104.32	640.3	536.0	0.3235	1.7440
1.3	106.56	0.0010487	1.350	106.66	641.2	534.5	0.3297	1.7357
1.4	108.74	0.0010504	1.259	108.85	642.0	533.1	0.3354	1.7315
1.5	110.79	0.0010521	1.180	110.92	642.8	531.9	0.3408	1.7260
1.6	112.73	0.0010537	1.111	112.89	643.5	530.6	0.3459	1.7209
1.7	114.57	0.0010553	1.050	114.76	644.1	529.3	0.3508	1.7161
1.8	116.33	0.0010569	0.9952	116.54	644.7	528.2	0.3554	1.7115
1.9	118.01	0.0010584	0.9460	118.24	645.3	527.1	0.3597	1.7071
2.0	119.62	0.0010599	0.9016	119.87	645.8	525.9	0.3638	1.7029
2.1	121.16	0.0010614	0.8613	121.40	646.3	524.9	0.3677	1.6989
2.2	122.65	0.0010628	0.8246	122.90	646.8	523.9	0.3715	1.6952
2.3	124.08	0.0010641	0.7910	124.40	647.3	522.9	0.3751	1.6917
2.4	125.46	0.0010654	0.7601	125.80	647.8	522.0	0.3786	1.6884
2.5	126.79	0.0010666	0.7316	127.20	648.3	521.1	0.3820	1.6851
2.6	128.08	0.0010678	0.7052	128.5	648.7	520.2	0.3853	1.6819
2.7	129.34	0.0010690	0.6806	129.8	649.1	519.3	0.3884	1.6788
2.8	130.55	0.0010701	0.6578	131.0	649.5	518.5	0.3914	1.6759
2.9	131.73	0.0010713	0.6365	132.2	649.9	517.7	0.3944	1.6730
3.0	132.88	0.0010725	0.6166	133.4	630.3	516.9	3793	1.6703
3.1	134.00	0.0010736	0.5979	134.5	650.6	516.1	0.4001	1.6676
3.2	135.08	0.0010747	0.5804	135.6	650.9	515.3	0.4028	1.6650
3.3	136.14	0.0010758	0.5639	136.7	651.2	514.5	0.4055	1.6625
3.4	137.18	0.0010769	0.5483	137.8	651.6	513.8	0.4081	1.6601
3.5	138.19	0.0010780	0.5335	138.8	651.9	513.1	0.4106	1.6579
3.6	139.18	0.0010790	0.5196	139.8	652.2	512.4	0.4130	1.6557
3.7	140.15	0.0010799	0.5064	140.8	652.5	511.7	0.4153	1.6536
3.8	141.09	0.0010809	0.4939	141.8	652.8	511.0	0.4176	1.6514
3.9	142.02	0.0010818	0.4820	142.7	653.1	510.4	0.4199	1.6494
4.0	142.92	0.0010828	0.4706	143.6	653.4	509.8	0.4221	1.6474
4.1	143.81	0.0010837	0.4598	144.5	653.7	509.2	0.4243	1.6454
4.2	144.68	0.0010846	0.4495	145.4	653.9	508.5	0.4264	1.6435
4.3	145.54	0.0010856	0.4397	146.3	654.2	507.9	0.4285	1.6416
4.4	146.38	0.0010865	0.4303	147.2	654.4	507.2	0.4306	1.6398
4.5	147.20	0.0010875	0.4213	148.0	654.7	506.7	0.4326	1.6380
4.6	148.01	0.0010884	0.4127	148.9	654.9	506.0	0.4346	1.6362
4.7	148.81	0.0010893	0.4045	149.7	655.2	505.5	0.4365	1.6345
4.8	149.59	0.0010901	0.3965	150.5	655.4	504.9	0.4384	1.6329
4.9	150.36	0.0010910	0.3889	151.3	655.6	504.3	0.4403	1.6313
5.0	151.11	0.0010918	0.3816	152.1	655.8	503.7	0.4422	1.6297
5.2	152.59	0.0010935	0.3677	153.6	656.3	502.7	0.4438	1.6265
5.4	154.02	0.0010952	0.3549	155.1	656.7	501.6	0.4493	1.6234
5.6	155.41	0.0010968	0.3429	156.5	657.1	500.6	0.4527	1.6205
5.8	156.76	0.0010984	0.3317	157.9	657.5	499.6	0.4559	1.6178
6.0	158.08	0.0010999	0.3213	159.3	657.8	498.5	0.4591	1.6151
6.2	159.36	0.0011014	0.3115	160.6	658.1	497.5	0.4622	1.6125
6.4	160.61	0.0011029	0.3023	161.9	658.5	496.6	0.4632	1.6100
6.6	161.82	0.0011043	0.2937	163.2	658.8	495.6	0.4681	1.6076
6.8	163.01	0.0011058	0.2855	164.4	659.1	494.7	0.4709	1.6052
7.0	164.17	0.0011072	0.2778	165.6	659.4	493.8	0.4737	1.6029

증기발생기 안전채널 압력은 MSBSCAL이 새로이 도입되면서 열출력계산에 이용되기 시작하였다. 따라서 그 중요성에 비추어 운영경험 자료는 많지가 않다. 하지만 2010년도 영광3호기가 MSBSCAL을 도입하여 운전을 시작한 이후로 증기발생기 안전채널 압력의 지시오류 현상이 관찰되었다. MSBSCAL은 일정하게 유지되고 있는데 반해 FWBSCAL은 감소추세를 나타내었다. 또한 원자로냉각재 온도(T_{avg}) 및 주증기모관 압력, HP TBN 1단 압력이 감소추세임이 관찰되었다. 이것은 FWBSCAL이 정확하게 지시하고 있음을 보여주는 것이다. 점검 결과 실제 원자로열출력이 감소(T_{avg} , 주증기모관 압력, HP TBN 1단 압력 감소)하고 있음에도 증기발생기 안전채널 압력이 일정하게 지시됨에 따라 MSBSCAL이 일정하게 지시하는 결과를 초래한 것으로 평가되었다.

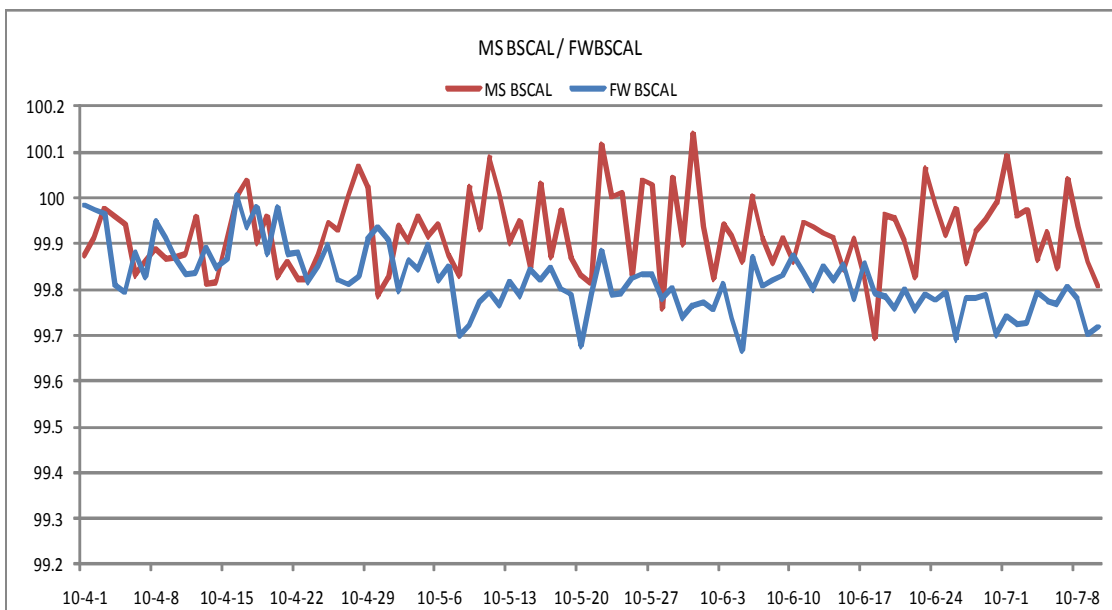


그림 3-6 2010년도 영광3호기 MSBSCAL/FWBSCAL 변화추이

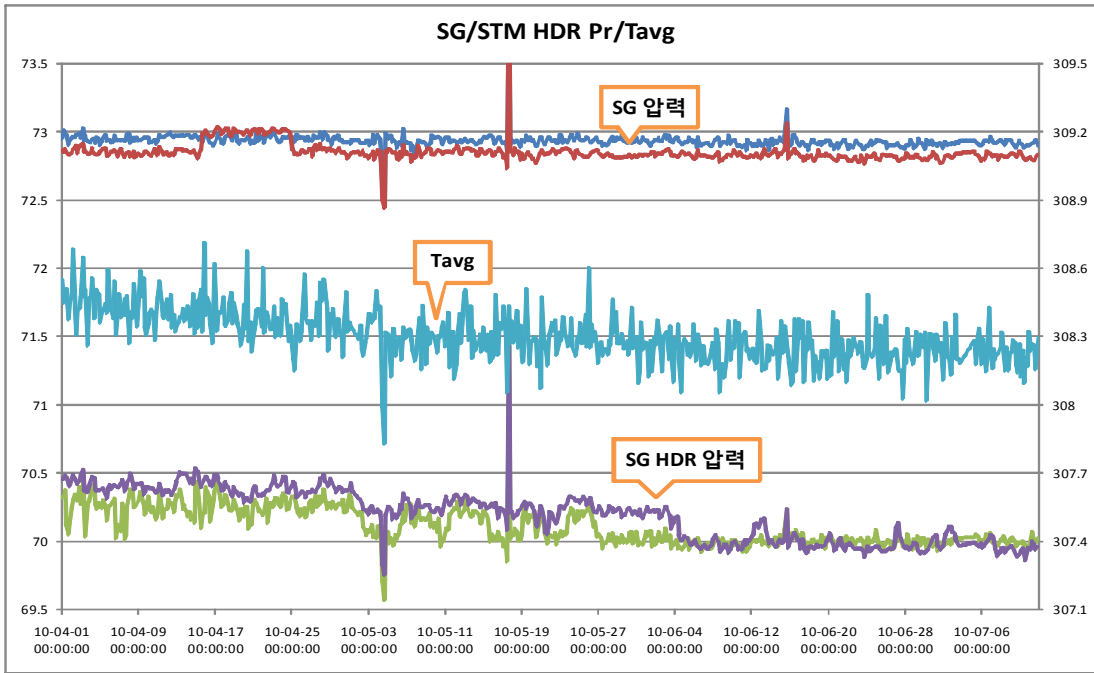


그림 3-7 2010년도 영광3호기 원자로열출력 관련변수 변화추이

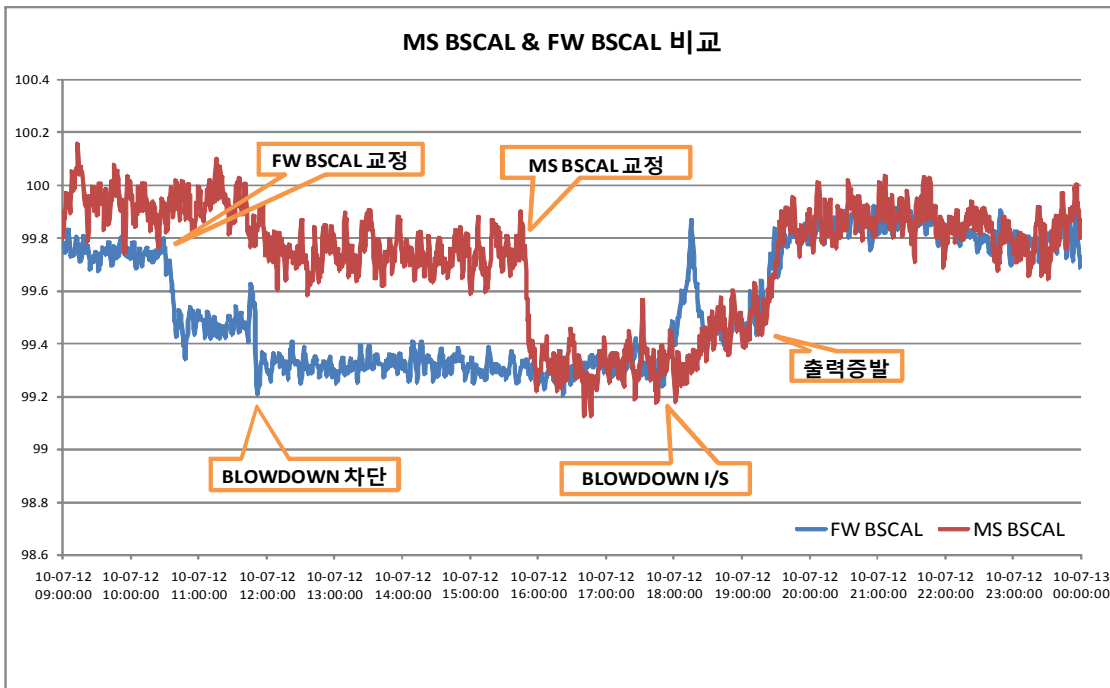


그림 3-8 2010년도 영광3호기 MSBSCAL / FWBSCAL 교정 전, 후 비교

제 3 절 열출력 측정오차 영향

이 절에서는 열출력 측정오차로 인해 원자로안전성에 영향을 미치는 2가지 효과에 대해서 살펴본다.

1. RCS⁸⁾ 질량유량

표준원전 RCS 질량유량의 측정은 COLSS 질량유량과 측정질량유량에 의해 이루어진다. COLSS 질량유량은 RCP⁹⁾ 차압을 이용한 방법이고, 측정질량유량은 BSCAL 열출력을 이용한 열평형 방법이다. 이들의 측정식은 다음과 같다.

$$\ast \text{ COLSS 질량유량}(Q) = aH + b + \Delta \quad (3-1)$$

H = RCP 케이싱 차압에 해당되는 수두(m)
a, b = 상수
 Δ = RCP 차압곡선의 Bias를 상쇄하기 위한 보정 값

$$\ast \text{ 측정질량유량}(Q) = \frac{BSCAL}{\Delta h} \quad (3-2)$$

Δh = RCS 엔탈피 상승($h_{hot} - h_{cold}$)
 h_{hot} = RCS Hot Leg 엔탈피
 h_{cold} = RCS Cold Leg 엔탈피

8) RCS : Reactor Coolant System(원자로 냉각재 계통)

9) RCP : Reactor Coolant Pump(원자로 냉각재 펌프)

발전소 운영기술지침서에서는 RCS 질량유량의 하한 값과 상한 값을 정하여 준수하도록 요구하고 있어 RCS 질량유량이 주기적으로 감시되고 평가되어야 한다. RCS 질량유량 하한 값은 원자로심에서 발생하는 열에너지를 적절히 뽑아 내는데 필요한 최소의 유량임을 보증하기 위해 설정하고, 상한 값은 냉각재 유량에 의한 수력학적 하중으로부터 원자로심을 비롯한 RCS 구조물의 기계적 건전성을 보장하기 위해 설정한 값이다.

만약 급수관 벤츄리의 Fouling 등의 영향으로 BSCAL 출력이 과대평가될 경우 실질적인 원자로출력은 감소될 것이므로 RCS 엔탈피는 감소하게 된다. 이에 따라 식 (3-2)의 측정질량 유량은 증가하게 된다. 반대로 BSCAL 출력이 과소평가될 경우에는 측정질량유량은 감소하게 되는 결과를 초래한다. 운영기술지침서에 명시된 하한값과 상한값을 초과할 경우 원자로 열출력은 정격열출력의 5% 미만으로 감소되어야 한다.

2. 인허가 출력

발전소는 인허가 출력이하로 운전되어야 한다. 이를 위해 표준원전에서는 COLSS MARGIN 경보를 갖추고 있는데 영광 3,4호기에서는 COLSS에서 계산되어지는 BSCAL 기준출력을 이용한다. 즉 MSBSCAL 또는 FWBSCAL 중 기준으로 선택되어진 출력의 순시 값이 100.5 % 을 넘기거나 1시간 평균값이 100% 을 넘길 경우 COLSS MARGIN 경보가 발생하게 된다. BSCAL 기준출력이 과대평가되어 인허가출력 제한치를 넘길 것으로 예상되면 운전원은 출력을 감발하여야만 한다. 반대로 BSCAL 기준출력이 과소평가되면 실제 원자로출력이 인허가출력 제한치를 초과할 가능성이 있다.

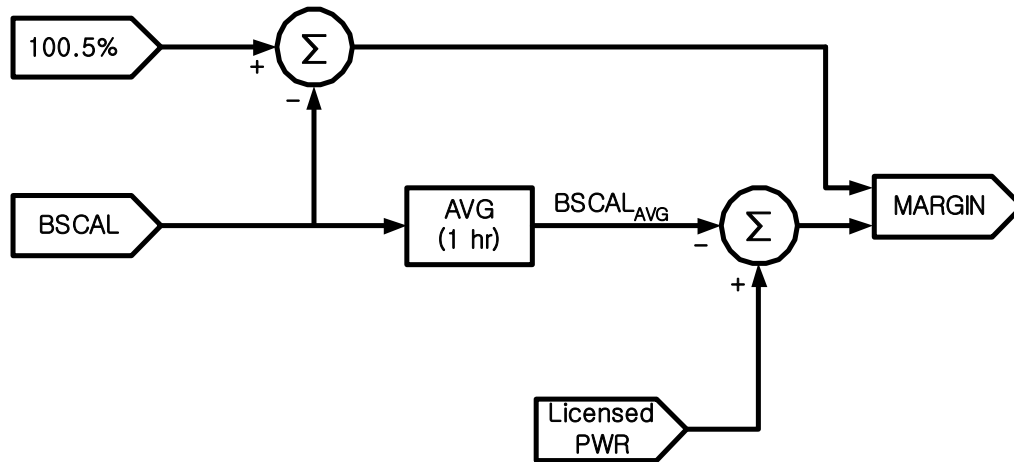


그림 3-9 영광 3,4호기 COLSS MARGIN 경보발생 논리

제 4 절 열출력측정 신뢰도 향상대책

발전소 열출력측정 신뢰도를 향상시키기 위해서는 FWBSCAL, MSBSCAL 계산에 영향을 미치는 인자들의 관리가 중요하다. 비록 MSBSCAL이 FWBSCAL 방법론의 단점을 보완하기 위해 도입되었다고는 하나 2절의 영광3호기 운전경험처럼 계측기 측정오차가 발생할 경우에는 이 역시 불완전해지므로 이들 2가지 측정방법론에 도입되는 개별인자들의 측정 신뢰도를 높여려는 노력이 필요하다.

1. 발전소 2차 계통수 처리

불확실도 평가결과에 나타나듯이 계측기 측정오차 발생의 경우를 제외하고는 주급수유량 기반의 FWBSCAL 측정방법이 주증기유량기반의 MSBSCAL 측정방법보다는 열출력을 보다 정확히 대변한다. 따라서 FWBSCAL 측정에 있어 가장 큰 오차발생 요인인 벤츄리 Fouling 현상을 방지하는 게 중요하다 하겠다. Fouling이 발생한 벤츄리 내부에서 채취한 슬러지의 성분을 분석한 결과 주성분은 산화철(98% 이상)이며, 이외에 니켈성분과 기타 금속성분 등으로 구성된 것으로 밝혀졌다. 이러한 화학적 조성은 증기발생기 슬러지에 비하여 산화철의 함량은 높고, 니켈과 탄소의 함량은 적게 포함되어 있으나 전반적으로 증기발생기 슬러지의 조성 과 비슷한 것으로 보아 증기발생기를 비롯한 2차 계통의 부식생성물이 축적된 것으로 판단된다. 부식생성물은 벤츄리 내부를 흐르는 2차 계통수의 수질이 저하될 경우 생성되므로 PH, 용존산소 등 2차 계통수의 보다 철저한 관리가 요구된다.

표 3-3 벤츄리 내부 슬러지 성분 분석결과¹⁰⁾

항목	Sample	단위	S/G #1 급수관 벤츄리 Sludge	S/G #2 급수관 벤츄리 Sludge
1	Fe as Fe ₃ O ₄	wt %	98.10	98.47
2	Ni as NiO	"	0.87	0.60
3	탄 소	"	0.22	0.19
4	Mn as MnO	"	0.15	0.20
5	Ca as CaO	"	0.13	0.12
6	Si as SiO ₂	"	0.12	0.12

10) 자료출처 ; 가동원전 엔지니어링서비스 기술개발(과학기술부, 2002)

2. 계측기 Drift, Error 감시

가. 운전변수 추이관찰 및 분석

주급수유량 기반 및 주증기유량 기반의 원자로열출력 측정은 전적으로 계측기의 측정 정밀도에 달려있다고 해도 과언이 아니다. 만약 측정과 관련된 계측기의 오차가 발생하면 원자로열출력 지시 값은 과대 또는 과소평가된다.

표 3-4 계측기 오차 영향

	FWBSCAL	MSBSCAL
FW Flow (↑)	↑	-
STM Flow (↑)	-	↑
FW Temp (↑)	↓	↓
증기모관 Pr. (↑)	-	-
안전채널 S/G Pr. (↑)	-	↑

◆ $\Delta P_{FW} (\uparrow) \rightarrow W_{FW}(\uparrow) \rightarrow \text{FWBSCAL}(\uparrow)$

$$\ast W_{FW} = k \left(\frac{Y C d^2 F_a}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \left(\frac{\sqrt{\Delta P_{FW}}}{\sqrt{v_{FW}}} \right)$$

$$\ast Q_{FW} = W_{FW}(h_{MS} - h_{FW}) - W_{BD}(h_{MS} - h_{BD})$$

◆ $\Delta P_{MS} (\uparrow) \rightarrow W_{MS}(\uparrow) \rightarrow \text{MSBSCAL}(\uparrow)$

$\rightarrow Y(\uparrow) \rightarrow W_{MS}(\uparrow) \rightarrow \text{MSBSCAL}(\uparrow)$

$$\ast W_{MS} = k \left(\frac{Y d^2 F_a}{\sqrt{1 - \beta^4}} \right) \left(\frac{\sqrt{\Delta P_{MS}}}{\sqrt{v_S}} \right) \times MSCF$$

$\rightarrow \text{FWP}(\uparrow) \rightarrow \text{급수엔탈피}(\uparrow) \rightarrow \text{FW/MS BSCAL}(\downarrow)$

$\rightarrow \text{PSG}(\uparrow) \rightarrow \text{증기엔탈피}(\uparrow) \rightarrow \text{FW/MS BSCAL}(\uparrow)$

$$\ast \text{FWP} = f(\text{PSEC}, \Delta P_{MS}), \text{PSG} = f(\text{PSEC}, \Delta P_{MS})$$

$$\ast Q_{FW} = W_{FW}(h_{MS} - h_{FW}) - W_{BD}(h_{MS} - h_{BD})$$

$$Q_{MS} = W_{MS}(h_{MS} - h_{FW}) + W_{BD}(h_{BD} - h_{FW})$$

◆ FWT (↑) → F_a (↑) → W_{FW} (↑) → FWBSCAL(↑)

※ $F_a = f(\text{FWT})$

→ V_{FW} (↑) → W_{FW} (↓) → FWBSCAL(↓)

→ 급수엔탈피(↑) → FW/MS BSCAL(↓)

◆ 증기모관 압력 (PSEC, ↑)

→ PSG(↑) → 증기엔탈피(↑) → FW/MS BSCAL(↑)

→ FWP(↑) → 급수엔탈피(↑) → FW/MS BSCAL(↓)

◆ 증기발생기 안전채널 압력 (SGP, ↑)

→ V_s (↓) → W_{MS} (↑) → MSBSCAL(↑)

→ F_a (↑) → W_{MS} (↑) → MSBSCAL(↑)

→ Y(↑) → W_{MS} (↑) → MSBSCAL(↑)

따라서 관련 운전변수의 지속적인 감시를 통해 계측기의 Drift/Error를 조기에 감지하는 것이 중요하다 하겠다. 감시에 포함되어야 할 핵심 운전변수는 다음과 같다.

- 주급수유량(Main Feedwater Flow)
- 주증기유량(Main Steam Flow)
- 고압터빈 1단 압력(HP Turbine 1st Stage Pressure)
- RCS 고온관-저온관 ΔT
- 주급수 온도(Main Feedwater Temperature)
- 발전기 출력(Generator Gross Megawatt)
- 증기발생기 취출수유량(S/G Blowdown Flow)

이밖에도 급수펌프 출구유량, MSR(Moisture Separator Reheater) 압력, Heat Balance 등 발전소마다 필요한 고유의 변수를 추가로 지정하여 상호 비교분석을 주기적으로 수행하면 열출력측정 계측기들의 Drift/Error를 조기에 감지해낼 수 있다.

나. $\Delta P/P$ Method

이 방법은 EDF에서 사용하고 있는 방법으로 고압터빈 1단 압력의 변동률을 감시함으로써 열출력측정오차를 감지하는 방법이다. 발전소가 전출력으로 안정된 상태에서는 증기발생기 취출수와 보조증기유량은 일정하므로 증기발생기에 공급되는 주급수유량은 고압터빈으로 공급되는 주증기유량과 직접적인 비례관계에 있다. 또한 고압터빈 1단 압력은 고압터빈으로 유입된 증기압력을 측정하는 것이므로 고압터빈 1단 압력의 변동률은 실질적인 주급수 및 주증기의 변동률과 비례관계에 있다.

$$\frac{dQ_f}{Q_f} \propto \frac{dQ_t}{Q_t} \propto \frac{dP_{1st}}{P_{1st}}$$

또한 주급수유량 측정 벤츄리나 주증기유량 측정 노즐은 Fouling 효과에 의한 측정오차가 발생할 수 있으나 고압터빈 1단 압력은 Fouling에 영향을 받지 않는다. 따라서 고압터빈 1단 압력의 변동률을 잘 주시하면 Fouling을 포함한 계측기 측정오차의 발생을 조기에 인지할 수 있다.

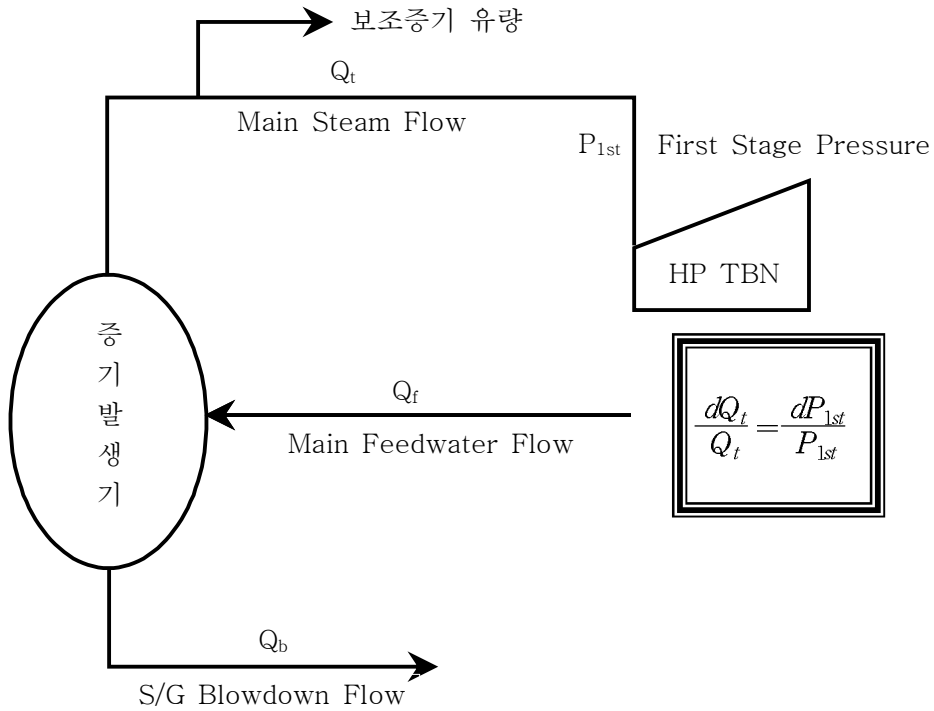


그림 3-10 $\Delta P/P$ 감시방법

고압터빈 1단 압력의 변동률은 계측기들의 불확실도를 고려한 Threshold 값을 설정하여 운영하도록 한다. 변동률이 미리 설정된 Threshold 값을 초과하면 오차발생요인에 대한 점검을 시작한다.

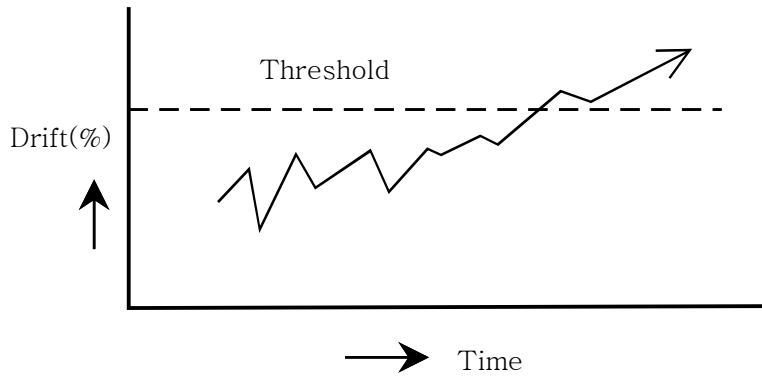


그림 3-11 $\Delta P/P$ 방법 Monitoring 예

제 4 장 결 론

지금까지 주급수유량 기반의 열출력 측정방법(FWBSCAL)과 주증기유량 기반의 열출력 측정방법(MSBSCAL)에 대해 살펴보았다. 불확실도 분석결과에 나타나듯이 FWBSCAL 원자로열출력 측정방법은 MSBSCAL 측정방법보다 높은 신뢰도를 가지고 있다. 하지만 주급수 질량유량의 과대평가를 야기하는 벤츄리 Fouling 현상은 원하지 않는 열출력의 손실을 가져왔다. 비록 주어진 범위내의 출력오차라 하더라도 원자력발전소 경제성에 미치는 효과는 작다고 볼 수 없다. 0.1%의 원자로열출력 오차는 약 10MW의 전기출력 변동효과가 있다. 이를 연간으로 환산하면 87,600MW가 된다. 경제적인 측면 이외에 원자로열출력 측정오차는 원자로냉각재 측정 질량유량 값의 변동을 야기한다. 원자로냉각재 질량유량은 노심을 냉각시키는데 중요한 운전인자로서 상한 값과 하한 값의 규제요건을 준수해야한다. 따라서 원자로열출력을 정밀하게 측정하는 것은 경제성뿐만 아니라 안전성 측면에서도 매우 중요한 사항이다. 벤츄리 Fouling 현상은 다수의 국내외 발전소에서 경험한 사항이다. 비록 벤츄리가 높은 정밀도를 가지고 있음에도 불구하고 추가적인 원자로열출력 검증방법의 도입을 요구하는 이유이기도 하다. 영광3,4호기에 도입된 주증기유량 기반의 MSBSCAL 측정방법은 그 운영경험이 많지 않아 장, 단점을 논하기에는 아직 이르다. 그러나 사례에서 제시한 영광3호기 운전경험은 시사하는 바가 크다. 주증기유량 기반 원자로열출력은 주기 초에 주급수유량 기반 원자로열출력으로서 교정이 필요하다. 이유는 주급수관에 설치된 벤츄리가 주증기유량을 측정하는 증기발생기 출구노즐보다 정밀도가 높고, 증기발생기 출구노즐을 따로 취외해서 실험실에서 교정을 할 수 있는 방법이 없기 때문이다. 이러한 이유로 벤츄리 Fouling 현상이 발생하지 않은 깨끗한 상태의 값인 운전주기 초의 FWBSCAL 출력으로서 MSBSCAL 출력 값을 교정해주고, 이후 MSBSCAL을 기준출력으로 선정하여 운전하고 있다. 하지만 증기발생기 안전채널 압력계측기의 측정오차로 인하여 오히려 MSBSCAL이 FWBSCAL보다 부정확한 현상이 영광3호기에서 관찰되었다. FWBSCAL 출력 값을 비롯하여 관련된 모든 운전변수들이 출력저하현상을 지시하고 있음에도 MSBSCAL 출력 값은 일정하게 지시되었던 것이다. 원인을 분석한 결과 증기발생기 압력을 측정하는 안전채널 계측기에서 측정오차가 발생한 것으로 평가되었다. 비록 MSBSCAL이 기준출력으로 선정되어 운전 중이더라도 관련된 모든 운전변수의 지속적인 감시가 꼭 필요한 이유이다. FWBSCAL, MSBSCAL 2가지 출력

값을 상호비교하면서 여기에 더하여 열출력 측정과 관련된 운전변수에 관심을 기울여야 한다. 예를 들어 증기발생기 배출증기가 외부로 누설되지만 않는다면 고압터빈 1단 압력은 원자로열출력과 비례적으로 응동한다. 또한 원자로냉각재 고온관과 저온관의 ΔT 는 비록 변동 폭이 크지만 원자로열출력을 직접적으로 대변한다. 이들을 포함한 관련 운전변수의 추이를 주의 깊게 감시하고 서로 연관 지어 분석한다면 보다 신뢰할 수 있는 원자로열출력 값을 얻을 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. EPRI TR-1014875 "Plant Support Engineering : Methodologies for Monitoring and Adjustment of Reactor Power Measurement Drift(2006)"
2. EPRI TR-1010833 "Instrumentation and Control Series, Module 11 Instrument Uncertainty Determination(1990)"
3. EPRI TR-109634 "Flow Meter Guideline(1999)"
4. EPRI TR-101388 "파울링 의심(1992)"
5. INPO SER 11-94, Supplement 1 "Feedflow Input Error to Secondary Calorimetric Results in Reactor Operation Above Thermal Power Limit(1995)"
6. KHNP 특정기술주제보고서(TR-KHNP-0017, 2009) "한국표준형원전용 주증기유량 기반 원자로열출력 측정 방법론"
7. 가동원전 엔지니어링서비스 기술개발(과학기술부, 2002)
8. COLSS 기능 설계요구서(KNF-MSCAL-07035)
9. 민봉근, "뉴로-퍼지 論理를 利用한 原子爐 熱出力 評價"
조선대학교 대학원 (2000)
10. 강영철, "원자력 발전소 주급수 온도가 열출력에 미치는 영향에 관한 연구"
삼척대학교 산업대학원 논문집(2002)
11. 이선학, "영광원자력 3,4호기 원자로냉각재온도 저감에 따른 영향과 출력복구에 관한 연구, 전남대학교 산업대학원 (2001)
12. 김만수, "정상운전 중 원자력발전소 전기출력 감소현상 원인규명에 관한 연구
전남대학교 산업대학원 (2008)
13. 영광2발전소 운영절차서 "노심-1201 이차측열출력 입증"
14. 영광2발전소 운영절차서 "노심-1221 : COLSS MSBSCAL 주증기유량 교정"
15. 영광2발전소 운영절차서 "노심-1222 COLSS MSBSCAL 열출력 입증"

感謝의 글

돌이켜보면 회사에 재직 중인 나에게 있어, 더욱이 아내와 두 아이를 둔 한 가정의 가장으로서 대학원 학업을 병행한다는 것은 결코 쉽지 않은 결정이었다. 하지만 조선대학교와 영광원자력본부 간 산학협력 증진의 일환으로 시행된 석박사과정의 개설은 다시는 찾아오지 않을 절호의 기회로 여겨졌다..

어느덧 2년의 세월이 훌쩍 지나가고 석사논문 제출이라는 최종단계에까지 이르렀다. 처음 시작할 때는 과연 헤낼 수 있을까 걱정도 많았지만 많은 분들의 도움과 격려 덕에 오늘 이 자리까지 올 수가 있었던 것 같다.

영광원자력 제자들을 위해 바쁜 시간도 마다하지 않으시고 멀리서 달려와 지도 해주신 조선대학교 원자력공학과 김승평 교수님, 정운관 교수님, 송종순 교수님, 이경진 교수님, 김진원 교수님께 감사를 드린다. 특히 너무나도 부족한 제자를 위해 매사 따뜻한 격려와 조언을 아끼지 않으셨던 나만균 지도교수님께 머리숙여 감사드린다.

또한 오늘의 이 자리가 가능하게끔 본 과정을 개설해 주신 이심교 전 영광원자력 본부장님, 남다른 교육에의 정열로 후원을 아끼지 않으신 심규열, 강재열 전, 현 영광원자력 본부장님, 바쁜 회사업무에도 불구하고 강의를 위해 시간을 쪼개어 주신 강현구, 장영균, 전제근, 장응수, 김대겸 전, 현 소장님과 양창호, 양연석 실장님께도 감사를 드린다.

마지막으로 학업을 병행하면서 소홀할 수밖에 없었던 한 가정의 가장을 위해 묵묵히 뒷바라지해준 아내와 아이들에게 이 모든 영광을 돌리고 싶다.

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20097290	과 정	석사
성 명	한글: 최 인 용 한문: 崔 仁 鎔 영문: In-yong, Choi				
주 소	광주광역시 북구 연제동 연제1차 대주피오레 107-2001				
연락처	E-MAIL : cheiye@khnp.co.kr				
논문제목	한글: 주급수/주증기 유량기반 原子爐 熱出力 測定에 관한 연구 영어: A Study on Reactor Thermal Power Calculation Methodologies Based on Feedwater Flowrate and Steam Flowrate for OPR1000 Plants				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 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 편집·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 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2010년 11월 일

저작자: 최 인 용 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하