

중수로 형 원전의 냉각재 중수 량 감시 방법 제안

The Proposal of the D₂O Inventory Monitoring Methodology
for Heavy Water Reactors

이광대, 송성일, 김종대
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

오재석
한국수력원자력(주) 월성원자력본부
경북 경주시 양남면 나아리 260

요 약

중수로 형 원전에서는 원자로 냉각재로 중수를 사용하고 있다. 냉각재는 원자로 내의 핵연료 다발을 통하여 핵분열 에너지를 열로 흡수하고, 냉각재 펌프에 의해 증기발생기로 순환되어 2차 측으로 열에너지를 전달하게 된다. 운전 중 냉각재 중수 량의 감소는 원자로 핵연료 냉각을 부족하게 하여 노심 안전성에 치명적인 결과를 야기할 수 있고, 격납용기 대기 중으로 고방사능 중수가 누설 될 경우에는 작업자 피폭을 초래 할 수 있다. 따라서 원전의 냉각재 량을 실시간, 온라인으로 감시하는 것은 원자로 안전성뿐만 아니라 작업자 보호를 위해서도 매우 중요하다. 현재, 국내뿐만 아니라 중수로 형 원전 설계국인 캐나다에서도 실시간 감시보다는 아직 수작업에 의해 오프라인 감시를 하고 있으며 정확도와 실시간성 문제로 비상 대응 능력이 부족한 단점이 있다. 여기에서는 중수로 형 원전 전체 냉각재 중수 량을 실시간으로 감시하는 방법을 제안하였으며 실제 발전소 데이터를 이용하여 Simulation하고 그 결과에 대해서 평가하였다.

Abstract

The heavy water reactors use D₂O as the reactor coolant. The coolant absorbs the heat energy from the fuel assemblies and transmits the energy to secondary heat exchangers such as the steam generators. The decrease of the coolant causes the decrease of the cooling capabilities on the fuel assemblies and has effects on the safety of the reactor. In this paper, the real-time monitoring methodology was proposed, simulated using operation data and evaluated

1. 서론

중수로 형 원전에서는 원자로 냉각재로 중수를 사용하고 있다. 냉각재는 원자로 내의 핵연료 다발을 통하여 핵분열 에너지를 열로 흡수하고, 냉각재 펌프에 의해 증기발생기로 순환되어 2차 측으로 열에너지를 전달하게 된다.

운전 중 냉각재 중수 량의 감소는 원자로 핵연료 냉각 율을 부족하게 하여 노심 안전성에 치명적인 결과를 야기할 수 있고, 격납용기 대기 중으로 고 방사능 중수가 누설 될 경우에는 작업자 피폭을 초래 할 수 있다. 따라서 원전의 냉각재 량을 실시간, 온라인으로 감시하는 것은 원자로 안전성뿐만 아니라 작업자 보호를 위해서도 매우 중요하다.

현재, 국내뿐만 아니라 중수로 형 원전 설계국인 캐나다에서도 실시간 감시보다는 아직 수작업에 의해 오프라인 감시를 하고 있으며 정확도와 실시간성 문제로 비상 대응 능력이 부족한 단점이 있다. 정확한 냉각재 량의 감시를 위해서는 많은 배관과 노심으로부터 관련 신호원이 측정 가능하여야하고 현실적으로 가동 원전에서는 신호원 추가는 거의 불가능한 상태이므로 이상적으로 정확한 측정은 경제성 등의 문제와 더불어 현실적으로 어려운 점이 많다.

본 논문에서는 가동 중인 중수로 형 원전의 안전성을 향상시키기 위하여 중수 량 냉각재 량을 온라인 감시하기 위한 실제적인 방법을 제안하였다. 먼저, 중수로 형 원전의 냉각재 계통인 열전달 계통(Heat Transport System)에 대해서 간략히 소개하였다. 발전소 전체 냉각재 량을 측정하기 위하여 원자로 Hot Leg, Cold Leg 중수 량과 가압기, 중수저장탱크, 중수수집탱크, 탈기응축기 탱크 중수 량을 측정하는 방법을 기술하였다. 그리고 실제 운전 자료를 이용하여 총 중수 량 계산 결과를 Simulation 하고 결과를 평가하였다.

2. 열 수송 계통 (Heat Transport System) 개요

중수로 형 원전의 냉각재 계통인 열 수송 계통(Heat Transport System)은 중수를 매개체로 하여 원자로에서 핵분열에 의해 발생한 열에너지를 증기발생기까지 수송하여 증기발생기 2차 측의 급수에 열에너지를 전달하는 주 기능을 가지고 있다 [그림 1]. 아울러, 핵분열에 의해서 발생한 열에너지를 핵 연료봉으로부터 흡수하여 연료봉 온도가 과도하게 상승하는 것을 방지하는 냉각 기능도 가진다.

열 수송 계통은 두개의 폐회로로 구성되며 각 회로에는 각 2대의 열 수송 펌프와 2개씩의 증기발생기가 연결되어있다. 각 회로는 190개의 핵연료 관과 이들 연료 관과 원자로 입구 모관 및 원자로 출구 모관 사이를 연결시켜주는 190개의 입구 공급 자관과 출구 공급 자관이 있다. 원자로 연료 관 출구에서의 압력은 9.89 Mpa, 온도는 590°F 이다.

- 중수 수집 탱크 중수 량
- 탈기 응축기 중수 량

따라서 다음 절부터는 각각에 대하여 중수 량을 측정하고 계산하는 방법을 설명하고자 한다. (여기서, 열 수송 계통의 Cold Leg과 Hot Leg의 중수 량 계산 방법은 AECL(Atomic Energy of Canada Limited) 에서 월성3,4호기 Inventory Control에 사용하는 방법을 사용하였음)

4. 열 수송 계통 Cold Leg 중수 량 측정

열 수송 계통은 2-Loop로 4개의 Hot Leg와 4개의 Cold Leg으로 구성되며 각각의 용량은 다음과 같다.

$$\text{Volume of Each Cold Leg Section} = 563.62 \text{ ft}^3 (15.962 \text{ m}^3)$$

$$\text{Volume of Each Hot Leg Section} = 519.21 \text{ ft}^3 (14.327 \text{ m}^3)$$

Cold Leg 중수 량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{Cold Leg Mass} = \frac{\text{Cold Leg Volume}}{\text{Cold Leg Specific Volume}}$$

Cold Leg이 Saturation 상태일 때 Specific Volume을 V_{cf} , Saturation Pressure를 P_{cs} 라 한다. 만일, Cold Leg Pressure P_c 가 Saturation Pressure보다 크면 Cold Leg Specific Volume은 V_{cf} 에서 $V_{cf} \times K_c(P_c - P_{cs})$ 로 감소하게 된다.

여기서, K_c 는 Bulk Modules of Compressibility of Cold Leg이며, 평균 Cold Leg 온도에서 1 Bar 압력 증가로 인한 1 ft^3 부피 감소로 정의되며 단위는 $(\text{ft}^3/\text{ft}^3 \cdot \text{bar})$ 이다.

Cold Leg Pressure P_c 는 Outlet Head Pressure- $P_{oh}(\text{Bar}(g))$ 와 Inlet-Outlet Header 사이의 압력 차의 합으로 근사된다.

$$P_c = P_{oh} + 12.41 \text{ Bar}(g)$$

$$\text{Cold Leg Specific Volume 은 } V_{cf}(1 - K_c(P_{oh_n} + 12.41 - P_{cs_n})) \text{ 이다.}$$

(n 은 Cold Leg 번호로 1,2,3,4 중 하나임)

$(P_{oh} + 12.41) \gg P_{cs}$ 이면

∴

$$\text{Cold Leg Mass } W_c = \frac{\sum_{n=1}^4 563.62}{V_{cf_n}(1 - K_c(P_{oh_n} + 12.41 - P_{cs_n}))}$$

V_{cf_n} 은 Cold Leg 온도 T_{ih_N} (Inlet Header 온도)에서의 Specific Volume이고, P_{cs_n} 은 T_{ih_N} 에

서의 Cold Leg Saturation Pressure이다.

5. 열 수송 계통 Hot Leg 중수 량 측정

(1) Hot Leg Enthalpy 계산

HTS의 각 Loop는 Cold Leg에서 원자로를 거쳐서 Hot Leg으로 중수가 흐르게 되며 원자로를 통과하면서 원자로 출력에 비례하는 Enthalpy 증가가 있게 된다.

$$\text{Hot Leg Enthalpy} = \text{Cold Leg Enthalpy} + \text{BTU/lb added by Reactor}$$

Cold Leg Enthalpy는 다음과 같이 근사된다.

$$H_{cN} = 2.068(T_{ihN}) - 65.58$$

$$\text{여기서, } H_{cN} = \text{BTU/lb, } T_{ihN} = \text{Cold Leg 온도(}^\circ\text{C)}$$

시간 $(t+\Delta t)/F_N$ 에서 원자로에서 더해지는 Enthalpy(BTU/lb)는

$$H_{rN} = 4.89325 \times 10^5 \times J_c(t+\Delta t)/F_N$$

따라서, 시간 $(t+\Delta t)$ 에서의 Hot Leg Enthalpy H_{hN} 는

$$H_{hN} = H_{cN} + H_{rN}$$

(2) HTS Mass Flow 계산

Loop당 2개의 Pump가 운전되고, Quality>0 인 경우,

HTS Mass는 다음과 같다.

$$F = 5174 - 0.8602(H_{c1}+H_{c2})/2 - 0.3216(H_{r1}+H_{r2})/2 - 1182(W_{g1}+W_{g2})/2$$

여기서, W_{gN} 은 Hot Leg 에서의 Quality

(3) Quality W_{gN} 계산

Hot Leg 내부에는 Saturated Steam W_{gN} lb, Saturated Liquid W_{fN} lb 가 있다고 가정할 때, $W_{gN} + W_{fN} = 1$, 혹은 $W_{fN} = 1 - W_{gN}$ 이다.

또한, Hot Leg Enthalpy는 다음과 같이 주어진다.

$$\text{Hot Leg Enthalpy } H_{hN} = W_{gN} \times H_{gN} + W_{fN} \times H_{fN}$$

$(1 - W_{gN})$ 을 W_{fN} 으로 치환하면,

$$W_{gN} = (H_{hN} - H_{fN}) / (H_{gN} - H_{fN})$$

정리하면,

$$W_{gN} = \frac{Hh_N + 0.4925 \times Poh_N^2 - 27.3805 \times Poh_N - 359.183}{770.048 - 26.3131 \times Poh_N - 0.065 \times Poh_N^2}$$

(4) Hot Leg Mass 계산

$W_{gN} > 0$ 일 때 Hot Leg Mass를 계산하기 위하여

$$\begin{aligned} \text{Specific Volume Mixture} &= W_{gN} \times V_{gN} + W_{fN} \times V_{fN} \\ &= W_{gN} (V_{gN} - V_{fN}) + V_{fN} \end{aligned}$$

따라서

$$\text{Hot Leg Mass } W_{hN} = 519.21 / (W_{gN}(V_{gN} - V_{fN}) + V_{fN})$$

6. 가압기 중수 량 측정

가압기 중수 량을 계산하기 위하여 가압기 내부 용적을 먼저 계산하고 가압기 기체 온도와 액체 온도를 이용하여 각각의 Specific Volume을 계산한다. 기체 체적과 기체의 Specific Volume, 액체 체적과 액체 Specific Volume을 이용하여 가압기 내부의 중수 량을 계산한다.

가압기 내부 용적을 계산하기 위한 간략도는 [그림 2]와 같으며 치수는 다음과 같다.

- 가압기 몸통 내부 직경 = 1,982 mm
- 가압기 하부 반구 반경 = 1,004 mm
- 하부 탭은 거의 바닥에 설치되어있음.

위의 간략도를 참고로 하여, 가압기 내부 체적은 하부 반구부와 중간 몸통 부분의 두 개 부분으로 나누어 계산하였으며 다음과 같다.

- 가압기 하부 반구면 체적

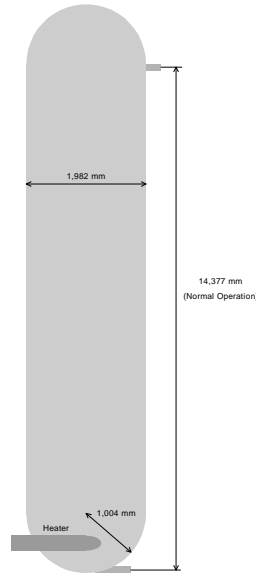
$$V_L = \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \times \Pi \times r^3$$

여기서, r = 원통 내부 반경

- 가압기 몸통(원통)에서의 체적

$$V_R = [(\Pi \times r^2) \times \quad]$$

수위 = (원통부 높이 - 1004 mm)



[그림 2] 가압기 간략도

- 가압기 액체 체적과 중량

$$V_F = V_L + V_R$$

- 가압기 기체 체적과 중량

$$V_S = 45.3 \text{ m}^3 - V_F$$

여기서, 45.3 m^3 은 가압기 전체 체적

- 가압기내의 중수 중량

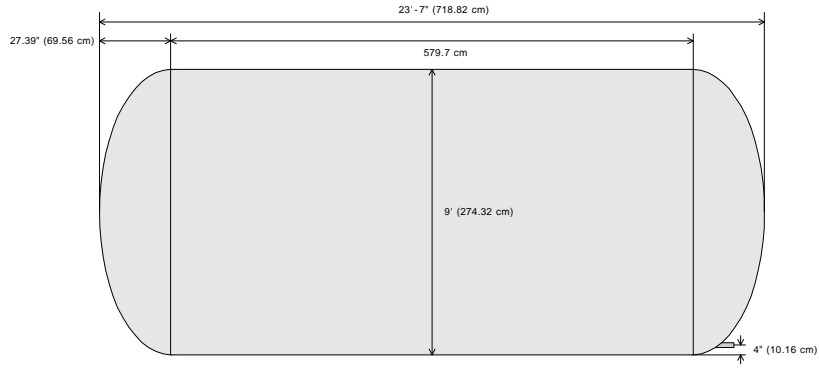
$$M_{pzt} = (V_F \times SP_F) + (V_S \times SP_S)$$

여기서, SP_F , SP_S 는 중수 액체, 기체의 Specific Volume

7. 중수 저장 탱크 중수량 측정

중수 저장 탱크의 경우에는 형상이 원통 수평 형이고 측면 반구가 접목된 형태로 간략도는 [그림 3]과 같다.

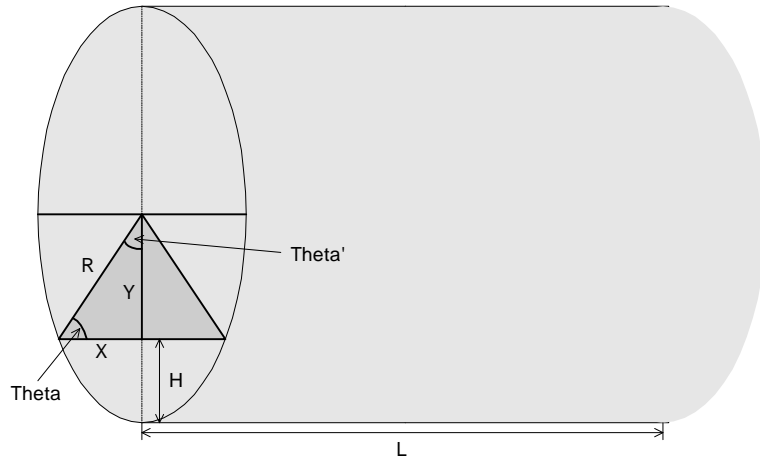
위의 간략도를 참고로 하여 수위에 대한 중수 저장 탱크 내부 체적은 중앙의 원통형과 측면 반구를 별도로 구하여 합산하는 방법으로 구하였다. 총 중수량은 (수위에 따른 중수 체적 \times Specific Volume)으로 계산하였다.



[그림 3] 중수 저장 탱크 간략도

(1) 중앙 원통 체적 계산

수위에 따른 원통 체적 계산을 위한 간략도는 [그림 4]와 같다.



[그림 4] 중수 저장 탱크 원통부 간략도

여기서, R = 원통반경

수위가 H 일 때, H까지의 원통 용적을 구하기 위하여 다음 과정으로 계산한다.

삼각형 높이 $Y = R - H$

삼각형 밑변 $X = \text{SQRT}[R^2 - (R-H)^2]$

삼각형 각도 $\theta = (180/\pi) \times \tan^{-1}(Y/X)$

두 개 삼각형 면적 = $X \times Y$

반경 R, 각도 θ' 인 원뿔 면적 = $\pi \times R^2 \times [(2 \times \theta')/180]$, 여기서 $\theta' = 180 - 90 - \theta$

\therefore 수위 H 에서의 원통 단면적(A) = 원뿔 면적 - 삼각형 면적

∴ 수위 H 에서의 원통 용적(V) = A × L

(2) 측면 반구 체적 계산

수위에 대한 측면 반구형 체적은 기계 설계에 가장 범용으로 사용되는 AutoCAD 프로그램을 이용하였다.

먼저, 실제 도면의 반구 형상을 AutoCAD로 입력하고 이 프로그램이 제공하는 면적 계산 기능을 이용하여 각 수위에 대한 반구 면적을 수위 1cm 마다 구하였다.

다음에 수위에 대한 면적을 최소 자승법을 이용한 5차 다항식으로 표현하였으며 결과 식은 다음과 같다.

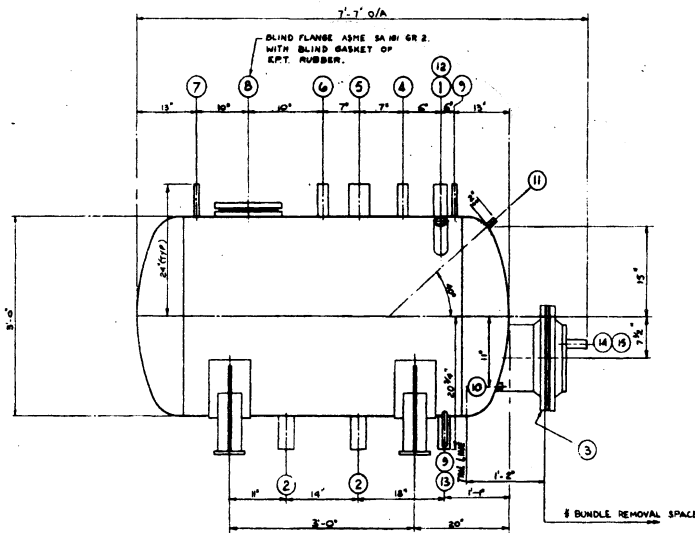
$$(\text{cm}^2) = (6 \times 10^{-18})x^5 - (1 \times 10^{-7})x^4 + (8 \times 10^{-5})x^3 - 0.811x^2 + 219.54x + 21.28$$

여기서, x=수위(cm)

위의 식을 수위 x 에 대해서 적분하면 임의의 수위 x에서 측면 반구의 체적을 구할 수 있다.

8. 중수 수집 탱크 중수량 측정

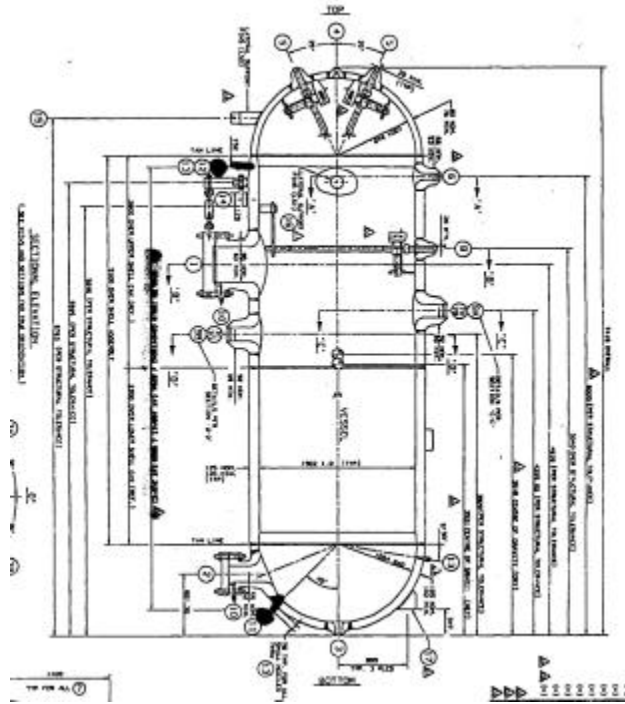
중수 수집 탱크 [그림 5]는 위의 중수저장탱크와 유사한 원통 수평 형으로 계산 과정은 동일하다. 즉, 내부 탱크의 중수 량 체적을 먼저 계산하고 중수 온도에 해당하는 Specific Volume을 계산한 후, 수위에 따른 중수 체적과 Specific Volume을 곱하여 중수 량을 계산하였다



[그림 5] 중수 수집 탱크 도면

9. 탈기 응축기 중수량 측정

탈기 응축기[그림 6] 는 위의 가압기와 유사한 수직 원통형으로 계산 과정은 동일하다. 즉, 내부 탱크의 액체와 기체 중수 량 체적을 먼저 계산하고 액체, 기체 중수 온도에 해당하는 각각의 Specific Volume을 계산한다. 중수 량은 액체 체적과 액체 Specific Volume, 기체 체적과 기체 Specific Volume을 곱하여 더하여 총 중수 량으로 계산한다.



[그림 6] 탈기 응축기 도면

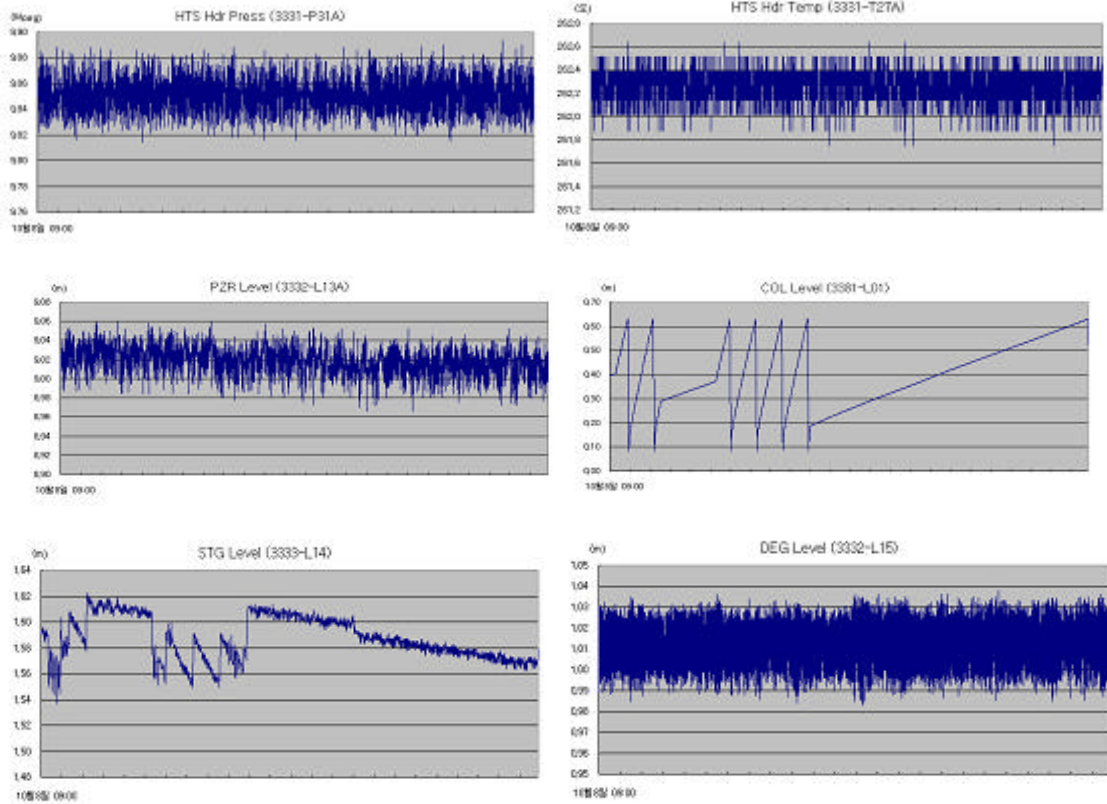
10. 총 중수량 측정 Simulation

여기에서는 위의 방법을 이용하여, 월성4호기의 24시간 실제 운전 데이터를 이용하여 냉각재 중수 량을 계산하여보았으며 여기에 사용한 운전 변수들의 거동은 [그림 7]과 같다.

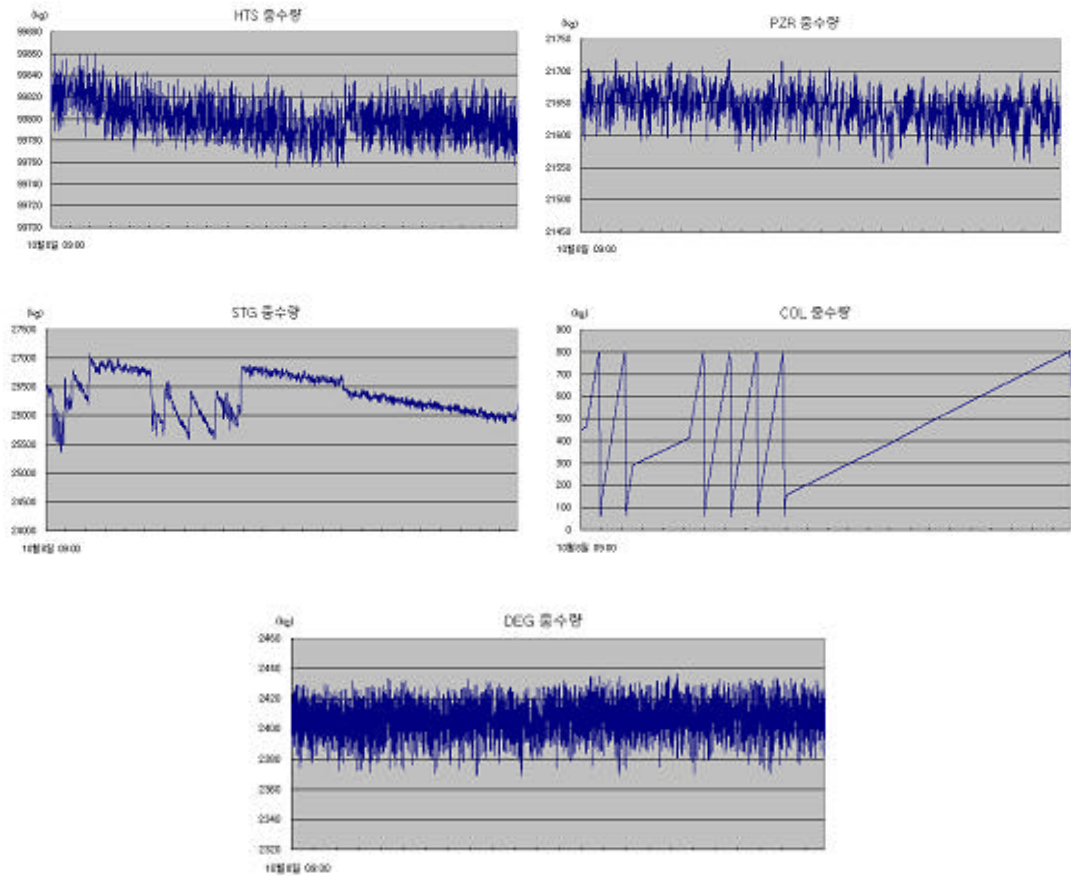
그림으로부터, 중수로 형 원전의 운전 중 핵연료 교체 특성에 따라, 중수 저장 탱크로부터는 Feed 되고 중수 수집 탱크로 Bleed 되는 현상이 뚜렷함을 알 수 있으며 기타 신호 값들은 거의 변동이 없음을 알 수 있다.

위의 운전 값을 사용하여 계산한 각각의 냉각재 중수 량 값은 [그림 8]과 같고, 발전소 기타 보조계통 중수 량 값을 반영한 총 중수 량은 [그림 9]와 같다.

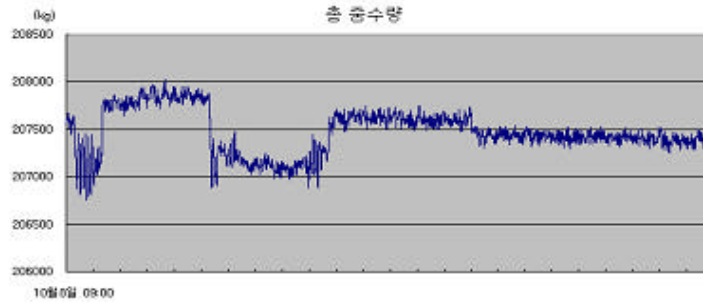
[그림 8]에서 열 수송 계통의 4개 Hot Leg와 4개 Cold Leg의 중수 량은 온도와 압력의 변화에 따라 24시간 동안에 $\pm 10\text{Kg}$ 정도의 변화가 발생하며 운전이 안정된 야간에서는 거의 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 중수 수집 탱크에서는 수위가 약 0.7m이상에서는 수집 펌프가 기동하여 중수 저장 탱크로 중수를 이송하고 있다는 것이 명확하게 나타난다.



[그림 7] 월성4호기 실제 중수 량 감시 운전 변수 값



[그림 8] 월성4호기 각 부분 별 중수 량 계산 결과



[그림 9] 월성4호기 운전 값을 이용한 총 중수량 계산 결과

[그림 9]에서는 월성4호기 냉각재 총 중수 량 변화를 나타낸 것으로 운전 중 핵연료 교체 기간을 제외하고는 약 207.5 톤의 총 중수 량이 측정됨을 알 수 있다. 특히, 운전 상태가 매우 안정된 야간의 경우에는 총 중수 량 측정 결과가 매우 안정적으로 나타 났으나 실제 발전소 측정 신호들의 흔들림에 따라 약 $\pm 10\text{Kg}$ 의 계산 결과의 변동이 나타남을 알 수 있다.

11. 결 론

원자력발전소의 원자로 냉각재는 노심 내부 핵연료로부터 열에너지를 전달받아서 증기발생기를 통하여 터빈 구동 에너지로 변환하는 열전달 매체 일뿐만 아니라 핵연료를 안전한 범위내로 냉각하는 중요한 역할을 한다. 또한, 냉각재는 방사화된 액체로서 냉각재 폐 루프로부터 누설이 되었을 경우에는 작업자뿐만 아니라 공중에 치명적인 영향을 미칠 수 있다.

따라서 냉각재 량을 실시간으로 정확하게 감시한다면 노심 건전성 확인뿐만 아니라 대형 사고를 사전에 방지하고 조치 가능하게 하여 원자력발전소의 안전성을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다. 그러나 운전 중인 발전소의 냉각재 량을 정확하게 측정하는 데는 필요 신호원과 숫자가 많이 필요하고 특히, 각 배관의 냉각재를 정확하게 측정할 수 있는 신호원이 설치되어 있지 못한 점, 경제적인 문제 등 현실적인 어려움이 많다.

여기에서는 현실적인 문제점, 경제성과 정확도 등을 고려하여 최소의 신호원과 경제성을 만족하면서 기술 지침서에서 요구하는 미확인 누설율 200Kg/시를 실시간으로 확인할 수 있는 방법에 대해서 연구하고 실제 운전 데이터를 이용하여 Simulation 하였다.

중수로 형 원전의 경우, 운전 중 핵연료 교체가 이루어지고, 이때 핵연료 교환을 위하여 냉각재 계통으로부터 수 백 Kg의 중수가 빠져나왔다가 재 보충되는 과정을 거친다. [그림 9]에서는 핵연료 교환을 포함한 24시간 동안의 총 냉각재량의 변화를 나타내고 있으며, 핵연료 교환 과정에서 약 300Kg의 중수 량 변화가 있는 것을 나타내주고 있다. 이러한 냉각재 변화를 제외하고 안정된 운전 상황, 특히 야간에서 총 냉각재 량은 약 207.5 톤을 나타내주고 있음을 알 수 있다.

여기의 측정 방법과 Simulation 결과로부터, 더 많은 신호들을 이용하여 기타 보조 계통 거동을 정확하게 반영하지 못한 점들로 인한 정확도 문제 등에 대해서 문제 제기가 가능 할 것이다. 그러나 현실적으로 가동 원전에서 각 배관으로부터 적절한 신호원 확보가 어려운 점, 경제성, 실시간 감시 등을 고려한다면, 위에서 제안된 방법은 안전성 향상을 위하여 적절한 방법으로 제시될 수 있을 것으로 판단된다.

12. 참고 문헌

- [1] Atomic Energy of Canada Limited, "Program Specification-Heat Transport System Inventory Control(86-63331-PS-401, Rev.1) for Wolsong 2,3,4", AECL, 1998
- [2] 박귀남 외, "월성1호기 발전실무(원자로운전원)", 한국전력공사 원자력연수원, pp 312-324, 1988
- [3] 박귀남 외, "중수로 개요(I)", 한국전력공사 원자력연수원, pp 200-279, 1989
- [4] 한국전력공사, "월성4호기 최종안전성분석보고서-열 수송 계통", 한국전력공사, 1998