

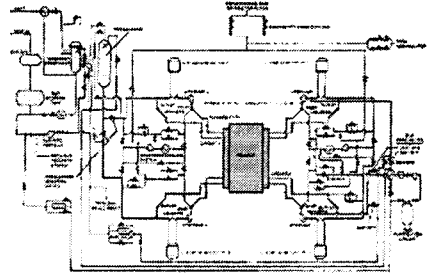
원자력발전소 냉각재 중수량 감시 방법론 개발

이광대, 송성일, 김종대, 오재석  
한국전력공사 전력연구원, 한국수력원자력(주) 월성원자력본부

Development of D<sub>2</sub>O Coolant Monitoring Methodology for Nuclear Plant

Lee Kwang Dae, Song Sung Il, Kim Jong Dae, Oh Jae Seuk  
Korea Electric Power Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Co.

**Abstract** - 원자력발전소 중 중수로 형 원전에서는 원자로 냉각재로 중수를 사용하고 있으며, 방사능 누출을 예방하기 위하여 폐회로 순환으로 냉각을 하게 된다. 운전 중 냉각재 량의 감소는 원자로 핵연료 냉각 율을 부족하게 하여 노심 안전성에 치명적인 결과를 초래할 수 있고, 열교환기 혹은 격납용기 대기 중으로 고방사화 중수가 누설될 경우에는 작업자의 피폭을 초래할 수 있다. 따라서 원전의 냉각재 량을 실시간, 온라인으로 감시하는 것은 원자로 냉각 안전성 뿐 만 아니라 작업자 보호 측면에서 매우 중요하다. 현재, 국내뿐만 아니라 중수로 형 원전 설계국인 캐나다에서도 실시간 감시보다는 아직 수작업에 의해 오프라인 감시를 하고 있으며 정확도, 실시간성 등에서 문제점들을 가지고 있다. 여기에서는 발전소 전체 중수 량 냉각재를 컴퓨터를 이용하여 실용적이고 신뢰도 높게 측정, 감시하는 방법론을 개발한 내용과 시스템에 대해 기술한다.



[그림 1] 열 수송 계통(Heat Transport System)

1. 서 론

본 논문에서는 가동 중인 중수로 형 원전의 안전성을 향상시키기 위하여 중수 량 냉각재 량을 온라인 감시하기 위한 실제적인 방법론 개발 내용을 설명한다. 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, 탈기용축기 탱크 중수 량을 측정하는 방법을 기술하였다. 그리고 실제 운전 자료를 이용하여 총 중수 량 계산 결과를 시뮬레이션하고 결과를 평가하였다.

2. 본 론

2.1 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 의해 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 9.89Mpa, 온도는 590°F 이다.

2.2 냉각재 중수량 측정 방법 개요

중수로 형 원전의 냉각재 중수 량을 측정하기 위해서는 모든 배관과 주요 기기가 가지고 있는 중수 량을 측정하여야하고 이를 위한 신호원이 설치되고, 취득 가능하여야 한다. 많은 정확한 계측 신호를 이용할수록 더욱 정확한 측정이 가능할 것이나 가동 원전에서는 현실적으

로 필요 계측 신호의 확보와 신호선 연결 등에서 어려움이 많다. 따라서 여기에서는 현실적인 한계와 감시의 용이성, 경제성 등을 고려하여 다음과 같은 기준으로 방법을 개발하였다.

- 계측 신호원 수는 최소화하고, 현재 설치된 신호원만을 이용한다.
- 경제적인 방법으로 가능하여야 한다.
- 측정 환경은 영 출력에서 전 출력 범위에서 사용가능하도록 한다.
- 운영 지침서상의 미확인 누설 량 200Kg/시, 확인 누설 량 0.45Kg/초 이상의 중수 량 변동이 감지되었을 때를 조치하기 위한 수단으로 사용가능하도록 한다.

위의 4개 기준을 만족하고, 발전소 냉각재 총 중수 량의 설계 값이 180톤(월성1호기의 경우) 정도인 점, 기타 보조계통의 중수 량은 많은 배관의 많은 측정 신호가 필요한 점, 설치되어 있지 않는 신호 등을 고려하여 기타 보조계통 중수 량은 실제 측정을 통하여 감시하는 것 보다는 운전 상수로 반영하는 것이 합리적인 것으로 판단하였다. 따라서 아래 4가지 중수 량의 합이 약 155톤이므로 이를 실시간 측정하더라도 의미 있는 중수 량 감시가 가능할 것이다.

- 열 수송 계통 Hot Leg & Cold Leg 중수 량
- 중수저장탱크 중수 량
- 가압기 중수 량
- 중수 수집 탱크 중수 량
- 탈기 용축기 중수 량

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

2.3 열 수송 계통 Cold Leg 중수 량 측정

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

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

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

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 Vcf, Saturation Pressure를 Pcs라 한다. 만일, Cold Leg Pressure Pc가 Saturation Pressure보다 크면 Cold Leg Specific Volume은 Vcf에서  $Vcf \times Kc(Pc - Pcs)$ 로 감소하게 된다. 여기서, Kc는 Bulk Modules of Compressibility of Cold Leg이며, 평균 Cold Leg 온도에서 1 Bar 압력 증가로 인한 1 ft<sup>3</sup> 부피 감소로 정의되며 단위는 (ft<sup>3</sup>/ft<sup>3</sup>·bar) 이다. Cold Leg Pressure Pc는 Outlet Head Pressure-Poh (Bar(g))와 Inlet-Outlet Header 사이의 압력 차의 합으로 근사된다.

$$Pc = Poh + 12.41 \text{ Bar(g)}$$

Cold Leg Specific Volume 은  $Vcf(1 - Kc(Poh_n + 12.41 - Pcs_n))$ 이다. ( n 은 Cold Leg 번호로 1,2,3,4 중 하나임 ) (Poh + 12.41) > Pcs 이면

$$\therefore Wc = \frac{\sum_{n=1}^4 563.62}{Vcf_n(1 - Kc(Poh_n + 12.41 - Pcs_n))}$$

Vcf<sub>n</sub>은 Cold Leg 온도 Tih<sub>N</sub>(Inlet Header 온도)에서의 Specific Volume이고, Pcs<sub>n</sub> 은 Tih<sub>N</sub> 에서의 Cold Leg Saturation Pressure이다.

## 2.4 열 수송 계통 Hot Leg 중수 량 측정

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

Hot Leg Enthalpy=Cold Leg Enthalpy+BTU/lb added by Reactor 이고, Cold Leg Enthalpy는 다음과 같이 근사된다.

$$Hc_N = 2.068(Tih_N) - 65.58$$

여기서, Hc<sub>N</sub> = BTU/lb, Tih<sub>N</sub> = Cold Leg 온도(°C)

시간 (t+Δt)/F<sub>N</sub> 에서 원자로에서 더해지는 Enthalpy(BTU/lb)는

$$Hr_N = 4.89325 \times 10^5 \times Jc(t+\Delta t)/F_N$$

따라서 시간 (t+Δt)에서의 Hot Leg Enthalpy Hh<sub>N</sub> 는

$$Hh_N = Hc_N + Hr_N$$

Loop당 2개의 Pump가 운전되고, Quality>0 인 경우,

HTS Mass F 는

$$F = \frac{5174 - 0.8602(Hc1 + Hc2)/2 - 0.3216(Hr1 + Hr2)/2 - 1182(Wg1 + Wg2)/2}{1}$$

여기서, Wg<sub>N</sub> 은 Hot Leg 에서의 Quality

Hot Leg 내부에는 Saturated Steam Wg<sub>N</sub> lb, Saturated Liquid Wf<sub>N</sub> lb 가 있다고 가정할 때, Wg<sub>N</sub> + Wf<sub>N</sub> = 1, 혹은 wf<sub>N</sub> = 1 - Wg<sub>N</sub> 이다.

또한, Hot Leg Enthalpy Hh<sub>N</sub> 는

Wg<sub>N</sub> × Hg<sub>N</sub> + Wf<sub>N</sub> × Hf<sub>N</sub> 이고, (1 - Wg<sub>N</sub>)을 Wf<sub>N</sub>으로 치환하면, Wg<sub>N</sub> = (Hh<sub>N</sub> - Hf<sub>N</sub>)/(Hg<sub>N</sub> - Hf<sub>N</sub>) 정리하면,

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

Wg<sub>N</sub>>0 일 때 Hot Leg Mass를 계산하기 위하여

$$\text{Specific Volume Mixture} = Wg_N \times Vg_N + Wf_N \times Vf_N \\ = Wg_N (Vg_N - Vf_N) + Vf_N$$

따라서

$$\text{Hot Leg Mass } Wh_N = 519.21 / (Wg_N(Vg_N - Vf_N) + Vf_N)$$

## 2.5 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

$$V_R = [(\pi \times r^2) \times \text{수위}]$$

수위 = (원통부 높이 - 1004 mm)

○ 가압기 액체 체적과 중량

$$V_F = V_L + V_R$$

○ 가압기 기체 체적과 중량

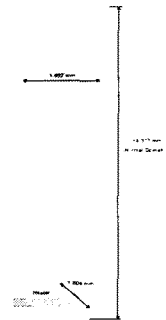
$$V_S = 45.3 \text{ m}^3 - V_F$$

여기서, 45.3 m<sup>3</sup> 은 가압기 전체 체적

○ 가압기내의 중수 중량

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

여기서, SP<sub>F</sub> , SP<sub>S</sub>는 중수 액체, 기체 Specific Volume



[그림 2] 가압기 간략도

## 2.6 중수 저장 탱크 중수 량 측정

중수 저장 탱크의 경우에는 형상이 원통 수평 형이고 측면 반구가 접목된 형태로서 수위에 대한 탱크 내부 체적은 중앙의 원통형과 측면 반구를 별도로 구하여 합산하는 방법으로 구하였다. 총 중수 량은 (수위에 따른 중수 체적 × Specific Volume)으로 계산하였다. 수위에 따른 원통 체적 계산을 위한 간략도는 [그림 3]과 같다.

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

삼각형 높이 Y = R - H

삼각형 밑변 X = SQRT[ R<sup>2</sup> - (R-H)<sup>2</sup> ]

삼각형 각도 θ = (180/π) × tan<sup>-1</sup>(Y/X)

두 개 삼각형 면적 = X × Y

여기서, R = 원통반경

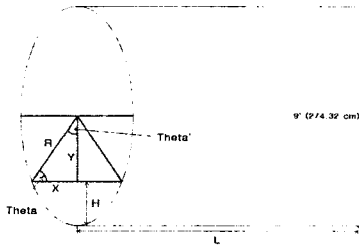
반경 R, 각도 θ' 인 원뿔 면적 = π × R<sup>2</sup> × [(2 × θ')/180],

여기서 θ' = 180 - 90 - θ

∴ 수위 H에서 원통 단면적(A) = 원뿔 면적 - 삼각형 면적

∴ 수위 H에서의 원통 용적(V) = A × L

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



[그림 3] 중수 저장 탱크 원통부 간략도

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.

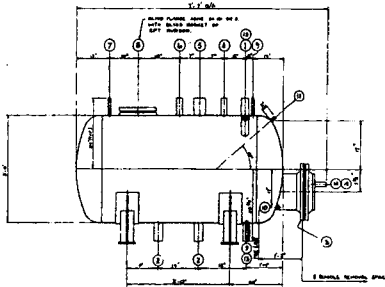
$$\text{수위당 면적 (cm}^2\text{)} = (6 \times 10^{-18})x^5 - (1 \times 10^{-7})x^4 + (8 \times 10^{-5})x^3 - 0.811x^2 + 219.54x + 21.28$$

여기서, x=수위(cm)

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

### 2.7 중수 수집 탱크 중수량 측정

중수 수집 탱크 [그림 3]은 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.



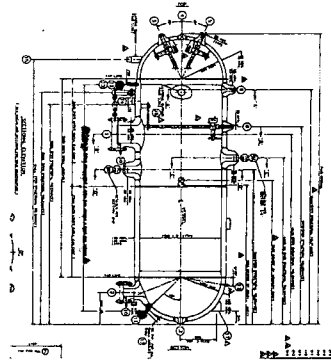
[그림 4] 중수 수집 탱크 도면

### 2.8 탈기 응축기 중수량 측정

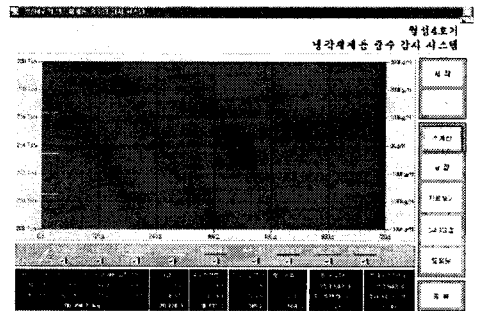
탈기 응축기[그림 5]는 위의 가압기와 유사한 수직 원통형으로 계산 과정은 동일하다. 즉, 내부 탱크의 액체와 기체 중수 량 체적을 먼저 계산하고 액체, 기체 중수 온도에 해당하는 각각의 Specific Volume을 계산한다. 중수 량은 액체 체적과 액체 Specific Volume, 기체 체적과 기체 Specific Volume을 곱하여 더하여 총 중수 량으로 계산한다.

## 3. 결 론

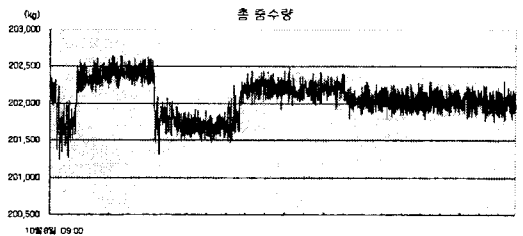
위의 방법론을 사용하여 개발한 감시시스템 운전 화면은 [그림 6], 운전 온도, 수위, 압력을 이용하여 시뮬레이션 한 결과는 [그림 7]과 같다. 시뮬레이션 결과로부터, 운전 과도가 발생하는 경우에도 발전소 총 중수량 약 202톤 중 약 ±500Kg 이내로 온라인 감시가 가능함을 알 수 있으며 안정적 운전이 수행되는 야간에는 매우 정확한 감시 결과를 보여주어 운전에 충분히 활용할 수 있는 수준임을 알 수 있다.



[그림 5] 탈기응축기 탱크 도면



[그림 6] 감시 시스템 운영 화면



[그림 7] 중수량 온라인 감시 Simulation 결과

### [참 고 문 헌]

- [1] Atomic Energy of Canada Limited, "Program Specification-Heat Transport System Inventory Control(86-63331-PS-401,Rev.1) for Wolsong 2,3,4", Page 4-1, 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-열수송 계통", 한국전력공사, 1998