

해체원전 계통제염을 위한 원자로냉각재내 유동특성 평가

김학수*, 이두호, 김덕기

한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

*hskim0071@khnp.co.kr

1. 서론

계통제염 기술은 발전소 영구정지 직후, 기존 발전소 운전계통을 최대한 활용하여 계통 전반의 선량률을 감소시키기 위해 화학제염제를 이용하여 배관이나 기기 내부 표면에 고착된 방사성오염물질을 제거하는 기술이다. 해외 원전해체과정에서 적용된 계통제염사례에서 알 수 있듯이 계통제염대상에 따라 제염효과를 극대화하기 위해 여러 가지 방법으로 순환유량(RCP, RHR Pump, 별도의 Pump 등)을 제공하고 있다. 본 논문에서는 WH 2-Loop 원전해체 시 계통제염 대상을 효과적으로 제염하기 위해 순환유량 제공원으로 RHR Pump를 사용할 경우에 RCS내에서의 유동특성을 평가하였다.

2. 본론

2.1 계통제염 대상

RHR Pump 운전에 따라 유동특성을 평가하기 위해 고려된 계통제염 대상은 RPV, SG, PZR, Hot/Cold Leg, RCP, CVCS 및 RHRS 이다.

2.2 원자로냉각재계통내 유량 특성

RHR Pump를 이용할 경우 RCS내 형성되는 유로를 평가하기 위해 정상운전 시 RCS내 압력손실 (ΔP)을 조사하여 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Pressure Drops in Reactor Coolant System

Equipment and Pipe	Pressure Drops*
Reactor Pressure Vessel ΔP , psi	41
Steam Generator ΔP , psi	41
Hot Leg Piping ΔP , psi	1.4
RCP Suction Piping ΔP , psi	3.4
Cold Leg Piping ΔP , psi	3.4

* : 3-Loop PWR design data

Table 1은 RCP가 운전되고 노심이 존재하는 조건의 값이며, 계통제염시 노심내 연료가 인출되기 때문에 RPV에서의 압력손실은 매우 낮게 형성될 것이다. Hot Leg 및 Cold Leg 압력손실은 RHRS과의 연결점을 기준으로 50%씩 분배되는 것으로

가정하였다. Fig. 1은 RHR Pump를 순환유량의 구동력으로 이용할 경우에 RCS에 형성되는 유로를 보여주고 있다.

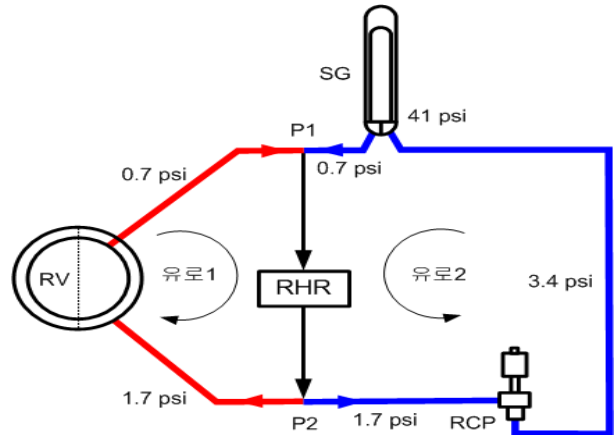


Fig. 1. Flow schematic in Reactor Coolant System.

유로 1을 통한 압력손실과 유로 2를 통한 압력손실은 동일하며 압력손실은 KQ^2 에 비례하므로 $K1 \cdot Q1^2 = K2 \cdot Q2^2$ 과 같이 기술할 수 있다.

- Q = flow, 102,900 gpm(3-Loop PWR data)

- K = resistance coefficient

2.3 유로 1 유동 특성

Fig. 1에서 유로 1은 RHRS \rightarrow Cold Leg 일부 \rightarrow RPV \rightarrow Hot Leg 일부 \rightarrow RHRS 으로 순환하는 유로로 RHR Pump 유량 2000 gpm 중 81.5%인 1,630 gpm의 유량이 형성된다.

Table 2. Flow Characterization of Path 1

구분	RHR Pump 유량 일부(@1,630 gpm) 조건 유속, ft/s	Reynolds No. @98°C
Cold Leg	0.881	5.99×10^5
Hot Leg	0.792	5.68×10^5
RPV	0.076	2.50×10^5

Table 2는 유로 1에서의 유동특성을 보여주고 있다. 계통 배관 내 고체성불순물 침적을 방지하기 위해 일반적으로 배관 내부 유속은 2 ft/s(0.6 m/s) 이상 되도록 설계한다. 이와 같은 유속은 수직배관,

밸브 및 오리피스 등과 같은 복잡한 형상을 고려한 유속이기 때문에 유로 1의 배관과 같이 복잡한 형상이 없고 수평배관의 경우 Table 2의 유속 조건에서 고체성불순물이 침적될 가능성은 낮은 것으로 판단되나, RPV의 경우 매우 낮은 유속으로 고체성불순물이 RPV 하부 영역에 침적될 가능성을 배제할 수 없을 것으로 판단된다.

2.4 유로 2 유동 특성

유로 2는 RHRs → Cold Leg 일부 → RCP Suction Leg → SG → Hot Leg 일부 → RHRs으로 순환되고 RHR Pump 유량 중 18.5%인 370 gpm의 유량이 형성된다. Table 3은 유로 2에서의 유동특성을 보여주고 있다.

Table 3. Flow characterization of Path 2

구분	RHR Pump 유량 일부(@370 gpm) 조건 유속, ft/s	Reynolds No. @98 °C
Cold Leg	0.200	1.36×10 ⁵
Hot Leg	0.180	1.29×10 ⁵
RCP Suction Leg	0.157	1.21×10 ⁵
SG Tube	0.070	1.14×10 ³

유로 2에 형성되는 유량은 370 gpm 정도로서, 배관 크기를 고려할 때 매우 낮은 유량으로 판단된다. 계통 배관에 흐르는 유체의 유속이 낮을 경우 구조적으로 트랩 형성이 가능한 부분 또는 U자형 배관의 아래 영역에 고체성불순물이 침적될 가능성이 높아진다. 유로 2에서 고체성불순물이 침적될 가능성이 있는 영역은 RCP suction U자형 배관, SG 수실 하부 영역 및 RCP 등이 해당된다.

2.5 유량 분배

RHR pump만으로 계통제염을 수행할 경우 유로 1과 2의 순환유량에 불균형이 발생한다. 이와 같은 순환유량 불균형 해소를 위해 별도의 설비가 필요하며, RPV를 제염 범위에서 제외하고 배관을 연결하는 설비(스파이더)를 추가하는 방안 또는 RPV내부에 유량제한용 저항체를 추가하는 방안 등을 고려할 수 있다. 이와 같이 설비를 추가하여 RHR Pump 유량을 균등하게 분배할 경우 1,000 gpm 정도의 유량 분배가 가능하다. Table 4는 노심영역에 유량저항체를 추가하여 유로 1과 2 모두 1,000 gpm이 흐르도록 변경한 경우에 대한 유동특성이다.

Table 4. Flow Characterization in RCS with Flow Resistant

구분	RHR Pump 유량 일부(@1,000 gpm) 조건 유속, ft/s	Reynolds No. @98 °C
Coldleg	0.540	3.68×10 ⁵
Hotleg	0.486	3.49×10 ⁵
RPV	0.047	1.81×10 ⁵
RCP suction leg	0.425	3.26×10 ⁵
SG tube	0.188	3.09×10 ³

RCP suction leg의 유속은 증가했지만 여전히 낮은 유속으로 판단되며, 유로 2의 유량이 늘어남에 따라 유로 1의 유량이 감소하게 되며 RPV에서의 유속이 또한 감소한다. 따라서 RPV 하부에 고체성 불순물이 축적될 가능성은 상대적으로 높아질 것이다.

3. 결론

본 논문에서 고려한 RHR Pump를 이용한 계통제염은 RCS 특성에 따른 극심한 유량 불균형에 의한 배관 및 기기에 고체성불순물 침적 가능성이 발생하게 되어 제염효율이 미비할 것으로 평가되었다. 유량 불균형을 해결하기 위해 별도의 설비를 추가하여 유량을 균등하게 분배하더라도 RHR Pump의 용량만으로 순환유량을 형성하기 때문에 여전히 유량 불균형이 발생하게 되어 RHR Pump를 순환유량의 구동력으로 사용하는데 한계가 있음을 확인하였다.

4. 감사의 글

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원에 의해 수행된 연구입니다 (No.2014510300310).

5. 참고문헌

- [1] 고리 1호기 최종안전성분석보고서.
- [2] 고리 3,4호기 최종안전성분석보고서.
- [3] EPRI, "PWR RCS Decontamination Engineering Evaluations and Reactor system Operating Procedure," TR-103431, (1994).
- [4] EPRI, "Decontamination Handbook," TR-112352, (1999).