

원자로 냉각재계통 RTD SCOOP내부 유속계산

윤덕주, 이창섭
전력연구원

요 약

기존의 우회배관을 제거하고 원자로냉각재배관에 직접 RTD를 삽입하여 온도를 측정할 경우 취수부내의 유속이 기존에 비해 어떻게 변하는지 고찰하고자 한다. 이는 RTD응답시간 요건을 만족하기 위해서는 RTD SCOOP 내부유속이 3ft/sec이상이 되어야만 하기 때문에 중요하다. 이러한 유속을 계산하기 위해 취수부를 단순화하고 보수적인 가정에 의해 유체역학적으로 계산한 결과 이러한 요건을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 흡입구와 출구 Hole에서 차압의 대부분이 발생하므로 이부분의 부차계수가 유량계산에 절대적으로 영향을 미치고 있으며 아울러 원자로냉각재유량의 크기에 따라 미치는 영향을 계산한 결과 거의 비례적으로 증가하고 있으며 출구직경을 확대하므로 유량을 3.5 ft/sec까지 증가시킬 수 있다는 결과를 얻었다.

1. 서 론

기존 RTD 온도측정방식은 냉각재를 RTD 우회배관계통의 매니폴드로 유로를 형성하여 각 매니폴드에 RTD를 삽입, 측정하였으나 밸브, 플랜지 등을 통한 냉각재 누설로 인한 발전 정지, 우회 배관 보수시 방사선 피폭량 증가등의 문제점이 발생하고있다. 그래서 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로써 RTD를 원자로냉각재배관의 취수부로 직접 삽입하여 측정하는 것이 바람직하다. 기존 RTD우회배관의 냉각재 취수 역할을 하던 SCOOP를 이용하여 냉각재 배관에 새로운 관통부의 필요성을 배제했으며 취수부(SCOOP)로 유입된 냉각재의 유로 형성을 위하여 각 취수부의 하부 끝단에 배출구를 가공한다. 여기서 이러한 취수부의 기능은 가압경수로의 고온관 온도가 배관의 전단면에 걸쳐 균일하지 않으므로 이러한 배관내부 온도 불균일현상을 최소화 하는 것이다. 또한 중요한사항은 이러한 개조로 인해 취수부내에서의 유속이 저하될경우 RTD응답시간에 영향을 줄 수 있다는 것이다. 즉 RTD 응답시간 및 정확도를 만족시키기 위해서는 취수부내의 유속이 3ft/sec이상이 되어야 하므로 이를 확인하기위해 이러한 취수부를 모델링을 하고 보수적인 가정에 의해 유체역학적으로 취수부(SCOOP)로 유입되어 출구로 나가는 유속을 계산한다.

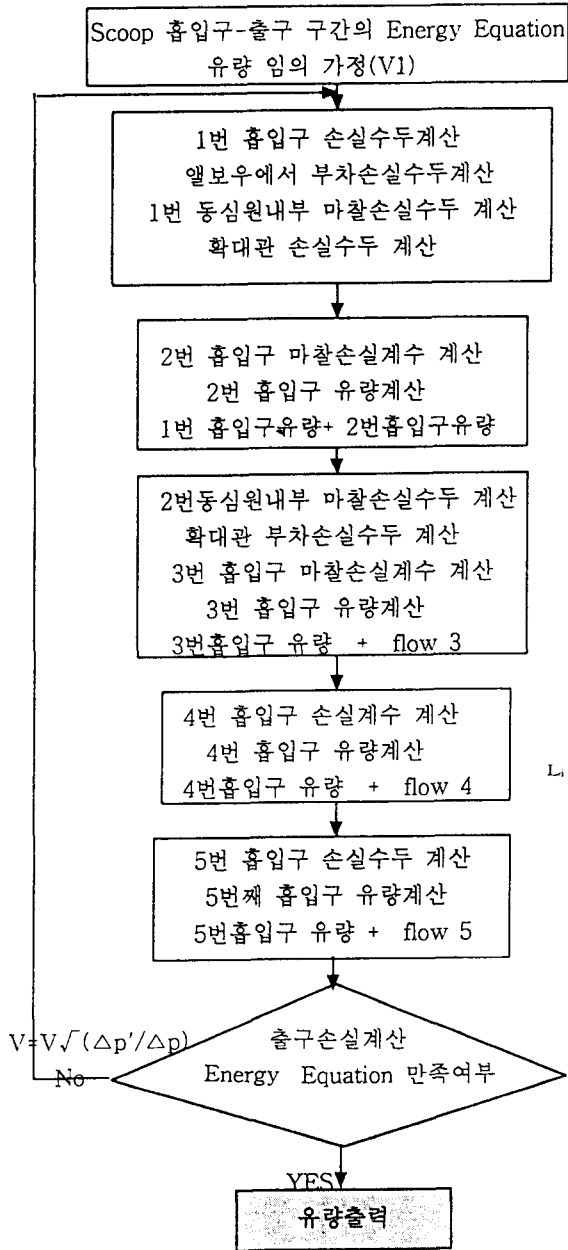


그림1. 유량 계산흐름도

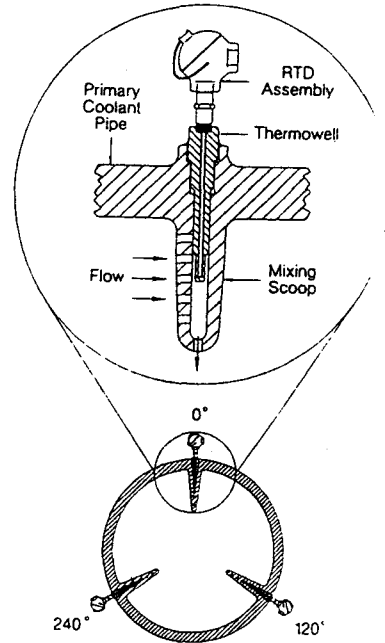


그림2a. RTD개략도

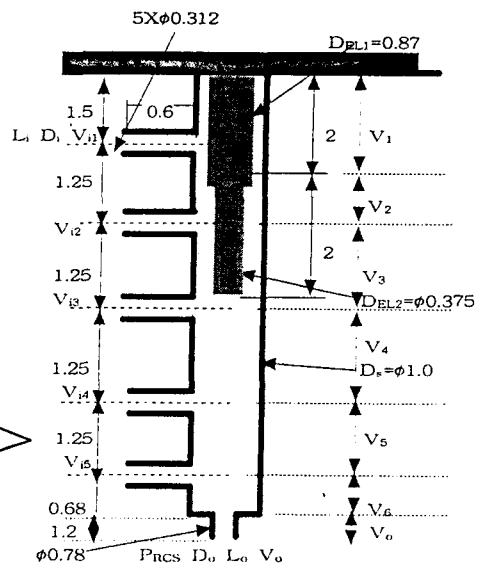


그림2b. 모델링

2. 보호관 내부 유속계산

가. 원자로냉각재계통 배관내부 유속계산

유량(Thermal design flow) = 89,000gpm = 198ft³/sec

$$V_{avg} = \frac{Q}{A} = \frac{198}{\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{29}{12}\right)^2} = 43.2ft/sec \quad (1)$$

레놀드수를 계산하면(온도=611°F, 압력=2,485 psi)

$$R = \frac{VD}{\nu} = \frac{43.2 \times 29}{0.145 \times 10^{-5} \times 12} = 7.2 \times 10^7 \quad (2)$$

원자로냉각재계통 배관내부가 난류유동이므로 Prandtl의 단면 속도분포방정식을 이용하여 계산 하면[1]

$$\frac{V_{RCS}}{V_{avg}} \approx \left(\frac{y}{R}\right)^n \quad (3)$$

여기서 보수적으로 계산해서 n=1/7 을 적용할 수 있다.

나. 정상유동의 비압축성유체에 대해 보호관흡입에서 출구까지 원자로냉각재계통의 유선을 따라 에너지방정식을 적용하면

$$\frac{P_{RCSi}}{\rho g} + \frac{V_{RCSi}^2}{2g} + z_i = \frac{P_{RCS0}}{\rho g} + \frac{V_{RCS0}^2}{2g} + z_0 + f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

여기서 Z_i와 Z₀의 차이는 작아서 무시한다..

손실수두 항목 fL/D는 작아서 무시한다.

V_{RCS0} 와 V_{RCSi} 는 같다.

취수부 흡입구부위와 출구부위의 압력은 같다고 가정할 수 있다

정상유동의 비압축성유체에 대해 보호관흡입에서 출구까지 보호관내부의 유선을 따라 에너지 방정식을 적용하면

$$\frac{V_{RCS}^2}{2g} = \frac{V_{exit}^2}{2g} + \sum K_{losses} \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

여기서 위치수두 항목과 압력수두 항목은 무시된다. 이러한 방정식의 해를 구하는 계산흐름은 그림1과 같다

다. 부차손실계수

①흡입구(N0_i)

입구에서 압력 손실수두는 배관의 입구(Sharp entrance), 배관내부 마찰손실 및 확대관 손실을 계산하면[2]

$$H_{entrance} = \left(K_{entrance} + f \frac{L}{D_i} + K_{expan}\right) \frac{V_{in}^2}{2g} \quad (6)$$

여기서 K_{entrance} = 0.5

$$f = \frac{1.325}{[\ln(\epsilon/3.7D_h + 5.74/R^{0.9})]^2} \quad \text{for } 10^{-6} \leq \frac{\epsilon}{D_h} \leq 10^{-2}, 5,000 \leq R_h \leq 10^8 \quad (6A)$$

$$K_{\text{exp an}} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 = \left(1 - \frac{0.312^2}{1^2 - 0.87^2}\right)^2 = 0.36 \quad (6B)$$

② 실린더

취수부내부에 RTD 보호관이 유로중앙에 저항하는 원형실린더로 가정할경우

$$K_{\text{cylinder}} = 1.2 \quad \text{for } \textit{Laminar} \quad (7)$$

$$K_{\text{cylinder}} = 0.3 \quad \text{for } \textit{Turbulent}$$

③ 엘보우

취수부내부를 들어간후 유선이 출구쪽으로 90 ° 회전한다고 가정하면서 이를 90 ° 엘보우로 계산한다면

$$H_{\text{elbow}} = K_{\text{elbow}} \frac{V^2}{2g} = 1.0 \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

여기서 $K_{\text{elbow}} = 1.0$

④ 환형구간

취수부내부의 보호관의 환형구간에 대한 마찰손실계수를 구하면[3]

$$H_{\text{annulus}} = K_{\text{annulus}} \frac{V^2}{\rho g} = \frac{64\psi}{R_{eD_h}} \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{\rho g} \quad (9)$$

여기서

$$D_h = 4 \frac{A}{S} = 4 \frac{\pi(D_S^2 - D_{EL}^2)/4}{\pi(D_S + D_{EL})} = D_S - D_{EL} \quad (9A)$$

$$R_{eD_h} = \frac{\rho V D_h}{\mu}, \quad (9B)$$

$$\psi = \frac{(D_S - D_{EL})^2 (D_S^2 - D_{EL}^2)}{D_S^4 - D_{EL}^4 - (D_S^2 - D_{EL}^2)^2 / [\ln(a/b)]} \quad (9C)$$

혹은 등가직경을 구하고 원형이라 가정하면

$$H_{\text{annulus}} = K_{\text{annulus}} \frac{V^2}{\rho g} = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{\rho g} \quad (10)$$

보수적으로 계산하기 위해 (9)식과 (10)식 중 큰값을 선택한다

⑤ 확관구간(Sudden Expansion)

1-2구간을 확관(Sudden Expansion)으로 가정하면서

$$H_{\text{exp an}} = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g} \quad (11)$$

⑥ 합류손실

출입구유량과 취수부내의 유량과의 합류점에서 상대유동에 의해 발생하는 손실을 고려하면

입구에서 압력 손실수두는 배관의 입구(Sharp entrance), 배관내부 마찰손실 및 합류점에서 흡입구의 합류손실을 계산하면

$$H_{entrance} = (K_{entrance} + f \frac{L_i}{D_i} + K_{expan}) \frac{V_i^2}{2g} \quad (13)$$

여기서 $K_{entrance} = 0.5$, $K_{expan} = (1 - \frac{d^2}{D^2})^2 = 0.815$ 이다. (13A)

또한 오리피스로 가정하면 $H_{orifice} = K_{orifice} \frac{V_i^2}{2g}$ 이다. (14)

여기서 $K_{orifice} = (\frac{1}{C_v^2} - 1)$, $C_d = C_c C_v$. (14A)

$$C_d = f(\beta) + 91.71\beta^{2.5}R_D^{-0.75} + \frac{0.09\beta^4}{1-\beta^4} F_1 - 0.0337\beta^3 F_2 \quad (14B)$$

$$f(\beta) = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 \quad (14C)$$

$$F_1 = 0, \quad F_2 = 0.47 \quad \text{이다.} \quad (14D)$$

보수적으로 계산하기 위해 13식과 14식 두값 중 큰값을 선택한다

⑧ 출구

출구에서 압력 손실 수두

$$H_{exit} = (K_{contract} + f \frac{L_o}{D_o} + K_{junction}) \frac{V_o^2}{2g} \quad (15)$$

여기서 $K_{contract} = 0.42(1 - \frac{d^2}{D^2}) = 0.164$, $K_{junction} = 0.1$ 이다. (16)

3. 계산결과

제(5)식을 만족시키는 유속을 계산한 결과는 표1, 표2와 같다. 표1은 각위치별 손실계수, 속도 및 손실수두를 나타냈으며 표2는 각흡입구와 출구의 속도와 손실계수를 표시하였다. 또한 그림 3에서는 출구직경변화에 따른 유속변화곡선을 나타냈고 그림4에서는 냉각재유속변화에 따른 최저속도변화곡선을 나타냈다.

표1. 각 위치별 속도 및 손실수두

위 치	손실계수 ($\sum K$)	속도 (ft/sec)	손실수 두(ft)
1번 흡입구	1.3229	26.4759	14.3992
엘보우&실린더	1.3000	10.6017	2.2689
1번환형구간& 합류손실	0.1804	10.6017	0.3148
1번 확대관	0.5143	10.6017	0.8975
2번환형구간1&합류손실	0.1352	2.9990	0.0189
2번환형구간2	0.2039	6.0901	0.1174
2번확대관& 합류손실	0.1198	6.0901	0.0690
4번 구간& 합류손실	0.1480	7.9040	0.1435
5번 구간& 합류손실	0.1479	10.5848	0.2573
출 구	1.4173	21.8351	10.4924

표2. 각 흡입구의 속도 손실계수

위 치	속 도 (ft/sec)	손실수 두(ft)
1번흡입구	26.4759	14.3992
2번흡입구	27.2893	17.8992
3번흡입구	27.4311	18.0856
4번흡입구	27.5397	18.2292
5번흡입구	27.7334	18.4865
출 구	21.8351	10.4924

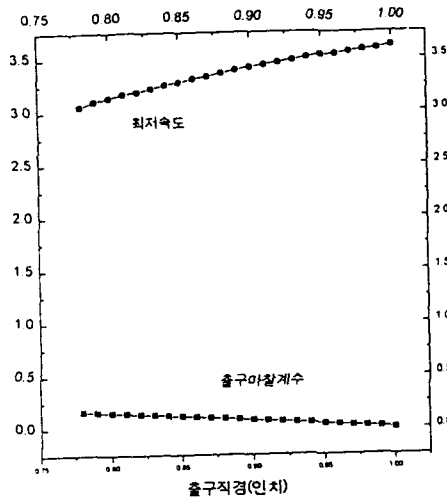


그림3. 출구직경변화에 따른 유속변화곡선

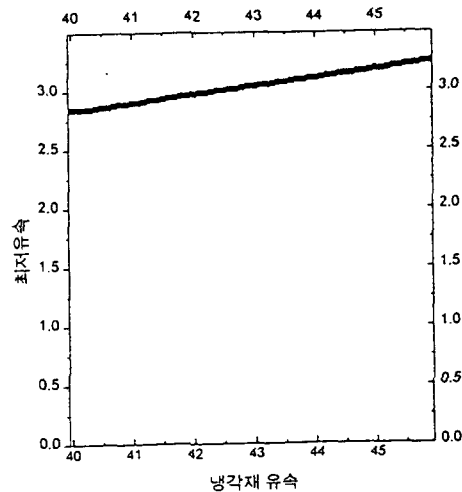


그림4. 냉각재유속에 따른 최저속도변화곡선

4. 결론

RTD 응답시간은 유속이 3ft/sec 이상이 되어야만 발전소 요건을 만족할 수 있기 때문에 취수부의 흡입구로 들어와 출구로 바로 나가는 개조방안에 대해 유속이 얼마나 형성되는가가 관심사로 대두되었다. 취수부를 단순화하고 보수적인 가정에 의해 유체역학적으로 계산한 결과 발전소 요건을 만족하는 것으로 나타났다. 즉, RTD 취수부내 RTD 감지부위의 속도가 발전소 응답시간요건 3 ft/sec보다 훨씬 큰 약 6ft/sec의 결과를 얻었다. 또한 흡입구와 출구 Hole에서 차압의 대부분이 발생하므로 이부분의 부차계수가 유량계산에 절대적으로 영향을 미친다는 사실을 알았다. 아울러 원자로 냉각재 유량에 불확실도가 포함되어 있는 점을 고려하여 원자로 냉각재 유량의 크기가 유속에 미치는 영향을 계산한 결과 거의 비례적으로 증가하고 있다. 그리고 출구 직경을 확대하므로 최소 유량을 3.5 ft/sec까지 증가시킬 수 있다.

5. 참고문헌

1. Victor L Streeter "Fluid mechanics", McGraw Hill, New York, 1983, Sixth Edition
2. P.K. Swamee and A.K. Jain, Explicit Equations for Pipe Problems J. Hydr. Div, Proc. ASCE, May 1976
3. Frank M White "Fluid Mechanics" McGraw Hill, New York, 1986, Second Edition
4. 박정기, 민용기, "유체역학", 학연사, 1994, 서울
5. McGarry, J.T., Versluis, R.M., "RTD By-Pass Loop Elimination on Pressurized Water Reactors", International Conference on Operability of Nuclear Systems in Normal and Adverse Environments, Opera 89, Lyon, France, September 1989.
6. McGarry, J.T., Lewis, R.T., "RTD By-Pass Loop Elimination on Salem Nuclear Power Plants", Third International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, Seoul, Korea, November, 1988