

## 원자로냉각재 RTD우회배관 제거 전후의 계통측정 정확도 평가

이재용  
전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

1980년대 이후로 원자로냉각재 온도를 계측하기 위한 RTD우회배관 계통을 제거하고 RCS 배관에 직접삽입식 RTD를 설치하여 온도를 계측하고 있다. 이에 고리 1,2,3,4호기에서도 직접삽입식 RTD를 설치하고자 한다. 이때 고온관 온도증화에 의한 계통측정정확도(PMA)가 설비 개선후 어떻게 변하는지 평가하였다. 평가 결과 RTD우회배관 계통의 PMA는 1.3°F이고 직접삽입식 RTD 계통은 1.0°F로 계산되어 설비 개선후의 불확실도가 작아짐을 확인하였다.

### 1. 서론

원자로냉각재 온도를 측정하기 위하여 원전의 초기설계시에는 고온관과 저온관에 하나의 직접접촉식 RTD를 삽입하였으나 이는 고온관의 온도 증류 현상을 반영하지 못했고 RTD교체시 계통의 배수가 요구되었다. 이를 해결하기 위해 1970년대 이후는 고온관에 120 ° 간격으로 세 개의 취수부(Scoop)를 설치하여 우회배관을 통해 직접접촉식 RTD를 설치하였다. 그러나 이는 밸브, 플랜지등을 통한 냉각재 누설로 인한 원자로 정지, 피폭량 증가등의 부작용을 초래하였다. 1980년대 들어 RTD우회배관을 제거하고 Thermowell을 통한 간접접촉식 RTD를 냉각재 주배관에 설치함으로써 이런 문제를 해결하고 있다. 고리 1,2,3,4호기에 대하여 RTD우회배관을 제거하고 원자로냉각재 배관에 RTD를 직접 삽입하여 온도를 측정할 때 고온관 온도증화에 의한 계통측정정확도(Process Measurement Accuracy;PMA)의 변경사항을 평가하고자 한다.

### 2. 고온관내 온도구배 결정

노심 출구 온도는 노심설계 방법에 따른 반경방향 출력분포로 인해 최대 30°F까지 차이이며, 고온관의 경우도 7 ~ 10°F 까지 차이가 나는 것으로 조사되었다. 그림 1 및 그림 2에 San Onofre 발전소와 Ginna 발전소의 고온관 외부 온도를 나타냈다. San Onofre 발전소의 210 °에서의 한점을 제외하면 원주방향 온도차는 8 °F 이하이고 고온관의 내경이 29인치이므로 온도분포를 대칭인 SINE 곡선으로 가정하면 고온관내 온도구배는 다음과 같다.

$$\frac{8^{\circ}\text{F}}{29\text{인치}} = 0.276^{\circ}\text{F}/\text{인치}$$

분포가 약간 비대칭이므로 최대 온도구배를 구해보면, 원주간 30 ° 범위에서 최대 4°F의 차이가 나므로 원주방향 온도구배 최대값은 다음과 같다.

$$4^{\circ}\text{F} * \frac{360^{\circ}}{30^{\circ}} * \frac{1}{(29\pi\text{인치})} = 0.527^{\circ}\text{F}/\text{인치}$$

이 값을 고온관 내부의 온도구배 최대값으로 가정할수 있으므로 이를 근거로 고온관 내부 온도구배 정격치를 0.5°F/인치로 정한다.

### 3. 고온관에서의 계통측정 정확도(PMA) 계산

#### 3.1 고온관내 온도분포

원주방향 온도분포 제한치 8°F 및 고온관내 온도구배 0.5°F/인치를 근거로 고온관내에서 몇가지 온도분포를 가정하였다. 그림 3은 원뿔형 온도분포를 등온곡선과 함께 나타낸 것이다. 그 외에도 두 개의 원뿔형 온도분포, 찌그러진 원뿔형 온도분포, 계단 온도분포, V자 모양 온도분포등을 가정하였다.

#### 3.2 우회배관 측정방법에서의 PMA

우회배관계통에서는 세 개의 Scoop에서 냉각제가 샘플되어 공통배관에서 온도가 측정된다. Scoop은 원주방향에서 1.5", 2.75", 4", 5.25", 6.5" 떨어진 위치에 5개의 취수구로 샘플하므로 이 샘플 유량의 온도를 평균하여 평균온도를 얻었다. 그림 3의 온도 분포는 중심에 대하여 임의의 각도로 분포할수 있으나 여기서는 계산 편의상 30°간격으로 나누어 한 온도분포에 대해 4가지 회전분포를 가정하여 계산하였다. 표 1은 가정한 6가지 온도분포에 대하여 평균온도 및 평균온도 오차를 나타냈다.

표 1 : 가정한 온도분포에 대한 평균온도 및 오차

CASE		1	2	3	4	5	6
온도분포 형태		원뿔모형 (4°F구배)	원뿔모형 (8°F구배)	두 개의 원뿔모형	찌그러진 원뿔모형	계단모형	V자모형
분기관 위치	0	5.9	9.8	4.5	9.4	8.0	8.0
	30	5.6	8.5	6.4	7.3	7.2	8.0
	60	4.7	6.5	7.8	4.9	4.5	8.0
	90	3.7	4.7	6.6	3	1.9	7.8
	120	2.8	3.2	4.5	1.8	0.3	5.6
	150	2.2	2.3	2.6	1.8	0	2.6
	180	2.0	2	1.4	2.7	0.1	0.4
	210	2.2	2.3	2.7	4	0	2.6
	240	2.8	3.2	4.5	5.5	0.3	5.7
	270	3.6	4.6	6.5	7.2	2	7.8
300	4.6	6.4	7.8	9	4.5	8.0	
330	5.6	8.5	6.4	9.4	7.2	8.0	
고온관 평균		4.14	5.33	5.17	5.60	3.10	5.93
3 분기관 평균	0-120-240	3.83	5.40	4.50	5.57	2.87	6.43
	ε	-.31	+.07	-.67	-.03	-.23	+.50
	30-150-270	3.80	5.13	5.17	5.43	3.07	6.13
	ε	-.34	-.20	0	-.17	-.03	+.20
	60-180-300	3.77	4.97	5.67	5.53	3.03	5.47
	ε	-.37	-.36	+.50	-.07	-.07	-.46
	90-210-330	3.83	5.17	5.23	5.47	3.03	6.13
	ε	-.31	-.16	+.06	-.13	-.07	+.20
Average ε		-.33	-.16	-.03	-.10	-.10	+.11

표 1에서 최대 고온관 온도 오차는 두 개의 원뿔형 온도분포에서 0.67°F를 보였다. 2루프나 4루프 발전소의 경우 원자로 용기 노즐이나 원자로 내부구조물이 대칭이기 때문에 고온관내의 온도분포가 각 루프별로 비슷할 수 있다. 그러므로 표 1의 고온관 오차의 평균은 계통오차(Systematic error)로 취급되어야 한다. 3루프의 경우 이 계통오차는 4루프나 2루프의 경우보다 작다. 표 1에서 최대 평균오차는 0.33°F이고 보수성을 위해 50%의 여유도를 두어 0.50°F를 계통오차로 정한다.

임의오차(Random error)를 구해보면 온도 분포를 120 °까지 회전시켰을때의 오차의 최대 변동폭과 평균 오차를 나타내면 표2와 같다. 표2를 보면 평균오차가 작은곳에서 큰  $\Delta \epsilon$ 가 발생한다. 0.33°F의 평균오차를 선택하면 임의오차는 다른 경우보다 작게된다. 그러므로 임의오차를 0.2°F로 정하면 표1 Case 3의 -0.67°F를 제외한 모든 경우를 커버할수 있다. 그러나 이 경우라도 여유있게 결정된 0.5°F의 계통오차로서 커버할수 있다.

표2 : 오차의 최대 변동폭과 평균 오차

Case	1	2	3	4	5	6
$\Delta \epsilon$	0.06	0.43	1.17	0.14	0.20	0.96
Avg $\epsilon$	-0.33	-0.16	-0.03	-0.10	-0.10	0.11

### 3.3 샘플유량 불평형에서 오는 오차

고온관의 세 Scoop에서 샘플된 유체는 공통배관에서 혼합되어 공통배관에 설치된 매니폴드에서 온도가 측정된다. 발전소의 기하학적 배치 문제로 고온관 샘플 분기관은 길이 및 형상이 각각 달라 분기관의 마찰계수가 달라 결국 샘플 유량이 달라지게 된다. 3.2항에서 구한 오차는 이 영향을 무시한 것이며 여기서는 고리 3,4호기를 대상으로 샘플 유량의 차이에 대한 영향을 평가한다. 원전의 1차 계통해석코드인 RELAP5/MOD3 코드를 이용하고 발전소 도면에서 자료를 취해 배관 형상에 따른 유량을 계산한 결과를 표3에 나타냈다.

표3 : 고리4호기 분기관에서의 유량(괄호안은 비율)

	Branch D (lbm/sec)	Branch C (lbm/sec)	Branch E (lbm/sec)	Average (lbm/sec)	Total (m <sup>3</sup> /hr)
LOOP 1	3.20(0.94)	2.94(0.86)	4.09(1.20)	3.41	50.5
LOOP 2	3.29(1.03)	3.45(1.07)	2.88(0.90)	3.21	47.5
LOOP 3	4.50(1.09)	3.88(0.93)	4.07(0.98)	4.15	61.5

표3을 보면 LOOP 1에서 유량 불평형이 심하므로 LOOP 1에 대해서 유량 불평형에 의한 오차를 표 4에 나타냈다. 표 4에 의하면 유량 불평형에 의한 오차는 계단분포에서 최대 0.45°F이며 오차의 평균중 최대는 0.28°F였다. 마찬가지로 LOOP 2에 대해서는 최대 오차가 0.22°F, 오차의 평균중 최대는 0.14°F였다. LOOP 3에 대해서는 최대 오차가 0.23°F, 오차의 평균중 최대는 0.14°F였다. 이를 근거로 유량 불평형에 기인하는 오차는 여유도를 두어 0.6°F로 정한다.

### 3.4 RTD우회배관 계통의 온도측정 PMA

위 항을 근거로 계통오차 0.5°F, 임의오차 0.2°F, 유량 불평형에 의한 오차 0.6°F를 합한 1.3°F를 RTD우회배관 계통의 온도측정 PMA로 정한다.

### 3.5 RTD우회배관 제거후 한점 계측에 의한 오차

RTD우회배관에 의한 온도 계측시는 Scoop내 5개 취수구로부터 유량을 샘플하여 이들의 평균값을 계측하게 되나 RTD 우회배관을 제거후 RCS배관에 RTD를 직접 삽입하면 Scoop내 5개 취수구중 가운데 취수구의 온도를 계측하게 된다. 이때 3.2항에서와 같은 방법으로 평균온도를 구하고 이 값과 5개 취수구로부터 얻은 유체의 평균온도를 비교하면 표 5와 같다. 표 5에 의하면 1지점 계측에 의한 오차는 계단분포에서 최대 0.20°F이며 오차의 평균중 최대는 0.09°F였다. 이 값들은 3.3항에서 구한 유량 불평형에 의한 오차보다 작다. 한점 계측에 의한 오차를 여유도를 고려하여 0.3°F로 정한다.

### 3.6 RTD우회배관 제거후 온도측정계통의 PMA

위를 근거로 RTD우회배관 제거후 온도측정계통의 PMA는 계통오차 0.5°F, 임의오차 0.2°F, 한점계측에 의한 오차 0.3°F를 합해서 1.0°F로 정한다.

## 4. 결론

RTD우회배관을 제거하면 유량 불평형에서 기인하는 오차 0.6°F를 제거할수 있으며, 한점 계측에 의한 오차 0.3°F가 부가적으로 늘어나나 전체적으로는 PMA 값이 1.3°F에서 1.0°F로 줄어들게 되어 고온관 온도측화에 의한 불확실도가 줄어든다.

## 5. 참고문헌

- 가. Westinghouse, Kori Unit 2 Replacement Core Licensing Report, 1993.5
- 나. WCAP-12515, STEPIT Menu Driven Setpoint Calculation Program, 1990.2
- 다. 97전력연-단61, 고리1,2호기 원자로냉각계통 RTD우회배관제거, 1997.3
- 라. KRC-93N-05, 고리3,4호기 원자로냉각계통 RTD우회배관 개선방안연구, 1995.7

표 4 : 분기관 유량 불평형으로 인한 오차(LOOP 1)

CASE		1	2	3	4	5	6
고온관 평균		4.14	5.33	5.17	5.60	3.10	5.93
세 분기관 평균							
0-120-240	유량평형시	3.83	5.40	4.50	5.57	2.87	6.43
	유량불평형시	3.77	5.27	4.50	5.66	2.71	6.39
	$\epsilon$	-0.06	-0.13	0	+0.09	-0.16	-0.04
30-150-270	유량평형시	3.80	5.13	5.17	5.43	3.07	6.13
	유량불평형시	3.83	5.16	5.35	5.68	3.06	6.37
	$\epsilon$	+0.03	+0.03	+0.18	+0.25	-0.01	+0.24
60-180-300	유량평형시	3.77	4.97	5.67	5.53	3.03	5.47
	유량불평형시	3.89	5.17	5.97	5.91	3.24	5.82
	$\epsilon$	+0.12	+0.20	+0.30	+0.38	+0.21	+0.35
90-210-330	유량평형시	3.83	5.17	5.23	5.47	3.03	6.13
	유량불평형시	4.03	5.53	5.40	5.85	3.48	6.39
	$\epsilon$	+0.20	+0.36	+0.17	+0.38	+0.45	+0.26
Average $\epsilon$		+0.07	+0.12	+0.16	+0.28	+0.12	+0.20

표 5 : 5지점 계측과 1지점 계측의 온도차

CASE		1	2	3	4	5	6
고온관 평균		4.14	5.33	5.17	5.60	3.10	5.93
3 분기관/RTD 평균							
0-120-240	5점 계측평균	3.83	5.40	4.50	5.57	2.87	6.43
	1점 계측평균	3.77	5.37	4.43	5.57	2.67	6.47
	$\epsilon$	-0.06	-0.03	-0.07	0	-0.20	+0.04
30-150-270	5점 계측평균	3.80	5.13	5.17	5.43	3.07	6.13
	1점 계측평균	3.73	5.03	5.13	5.27	3.03	6.17
	$\epsilon$	-0.07	-0.10	-0.04	-0.16	-0.04	+0.04
60-180-300	5점 계측평균	3.77	4.97	5.67	5.53	3.03	5.47
	1점 계측평균	3.77	4.90	5.70	5.47	3.00	5.33
	$\epsilon$	0	-0.07	+0.03	-0.06	-0.03	-0.14
90-210-330	5점 계측평균	3.83	5.17	5.23	5.47	3.03	6.13
	1점 계측평균	3.73	5.03	5.13	5.37	3.03	6.17
	$\epsilon$	-0.10	-0.14	-0.10	-0.10	0	+0.04
Average $\epsilon$		-0.06	-0.09	-0.05	-0.08	-0.07	-0.01

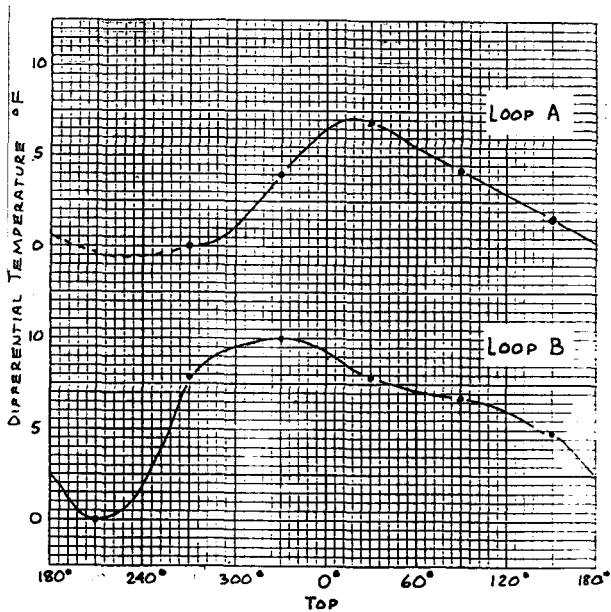


그림1 : San Onofre 발전소 고온관 외부 온도차

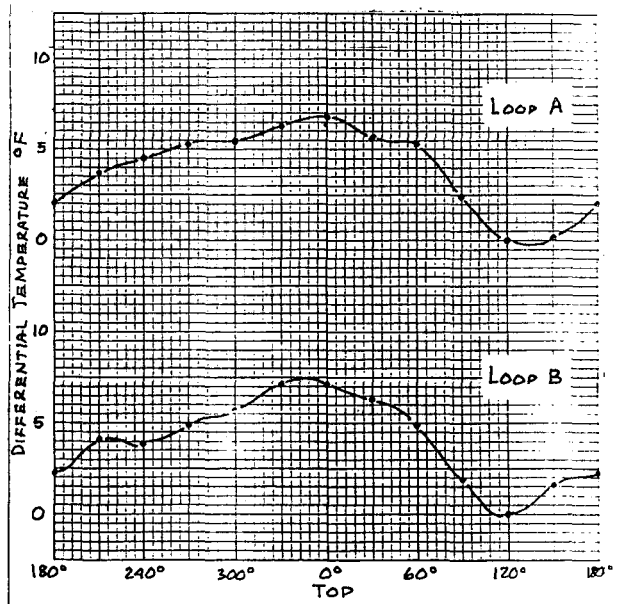


그림2 : Ginna 발전소 고온관 외부 온도차

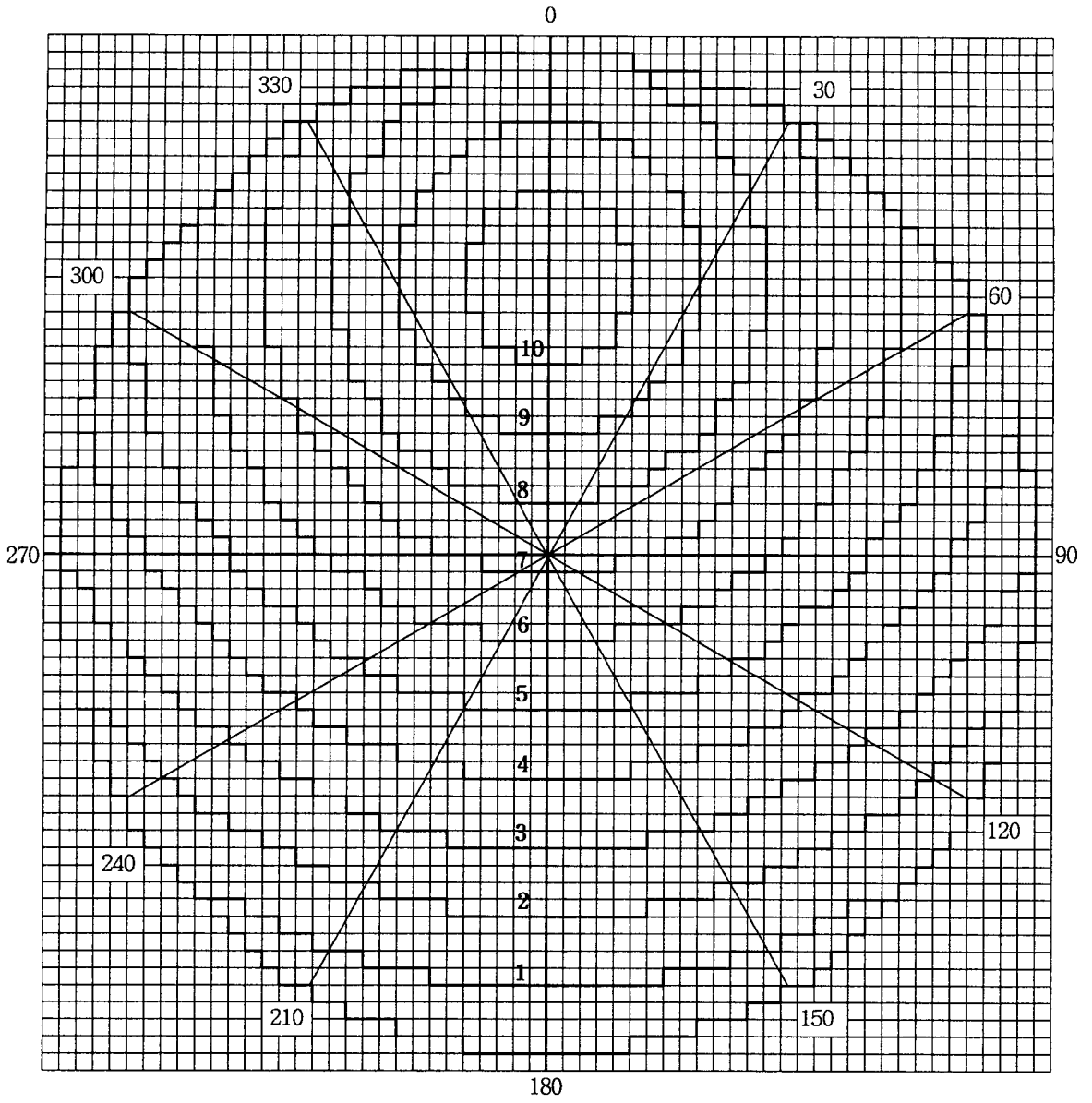


그림 3 : 고온관내 원뿔형 온도 분포  
(Case 2 : 원주온도차이 8°F)