

고리 1,2호기 OPDT & OTDT 채널의 계측 불확실도 분석

**Assessment of Measurement Uncertainties for OPDT & OTDT Channel
at Kori 1, 2 Nuclear Units**

윤 원영, 주 운표, 지 성현

한국 원자력 안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요약

고리 1,2 호기 과출력 보호채널(OPDT/OTDT)의 계측 불확실도를 비교 분석하였다. 고리 1 호기 및 2 호기 보호계통은 각각 디지털 계통과 아날로그 계통으로 설계되어있다. 계측 오차의 결합 방식으로, 독립적 오차 결합의 경우 통계적 합산을 취하고 종속적 오차 결합의 경우 산술적 합산을 취하였다. 계측 오차의 입력자료는 설계 문서와 현장 절차서를 근거하였다. 계산 결과 개별 오차 발생 원에 대한 상대 점유율을 제시하였으며 고리 1 호기 디지털계통의 계측오차가 고리 2 호기 아날로그계통에 비하여 약 0.5 % ~ 3.0 % 적게 나타남을 확인하였다.

Summary

Measurement uncertainties for overpower Delta T and overtemperature Delta T (OPDT & OTDT) protection channel at Kori 1 and 2 nuclear units are comparatively analyzed. Protection systems of the Kori 1 and 2 nuclear units are designed by digital and analog based systems respectively. For the combination of measurement uncertainties, the root-sum-of-square method is applied to the random data combination and the algebraic method is applied to the dependent data combination. Input data are selected from the design documentation and the surveillance test procedures. The results shows the relative importance of the uncertainty factor. Additionally, it is also demonstrated that the uncertainties of the digital protection system at Kori 1 nuclear unit are approximately 0.5 % ~ 3.0 % lower than those of the analog protection system at Kori 2 nuclear unit.

1. 서론

1.1 개요

가압 경수로 원자로 보호계통 설계의 기본 개념은 가동중인 원자로심의 출력과 원자로 냉각수의 상태를 신뢰성 있고 정확히 감시하여 사전에 설정된 안전 제한치를 초과 시 원자로를 신속히 트립 시킴으로서 노심 내 핵연료의 손상을 사전에 방지하는 것이다. 웨스팅하우스형 가압 경수로 설계의 경우 발전소 출력운전 시 핵연료의 과다출력 발생에 대한 원자로 보호 기능은 각각 Overpower Delta T (OPDT) 및 Overtemperature Delta T (OTDT) 원자로 정지 채널에 의해 수행되고 있다. 이러한 기능적 중요성으로 인하여 그간 이들 채널의 설계 안전성에 대한 검토가 원전의 인허가 심사 과정에서 중요시 다루어져왔으며 국내 연구기관에서도 이와 관련한 분석 연구가 수행된 바 있다. 그러나 고리 1, 2 호기 원전의 경우 현장 설계자료의 부족과 최근 수행된 고리 1호기 설비개선 등으로 인하여 원자로 보호계통 설계 타당성에 대한 체계적인 분석이 이루어지지 못한 실정이다.

본 연구에서는 이들 원전의 원자로 보호계통 중 핵심적인 기능을 담당하는 OPDT & OTDT 원자로 정지 채널에 대한 계측 불확실도를 비교 분석하였다.

1.2 OPDT & OTDT 계측채널 구성

OPDT & OTDT 계측채널은 원자로의 과 출력 운전을 사전에 방지하기 위하여 원자로 냉각수 고온관과 저온관의 온도차, 노심 내 증성자 속 출력 및 가압기 압력을 측정하여 각 각의 신호를 식(1), (2)에 나타난 함수로 조합함으로써 원자로 트립 조건을 결정한다.

$$OTDT = \Delta T [K_1 - K_2 \frac{1 + \tau_1 S}{1 + \tau_2 S} (T_{avg} - T_{avg}^{nom}) + K_3 (P - P^{nom}) - f_1(\Delta D)] \dots \dots (1)$$

$$OPDT = \Delta T [K_4 - K_5 \frac{\tau_2 S}{1 + \tau_3 S} T_{avg} - K_6 (T_{avg} - T^{oavg}) - f_2(\Delta D)] \dots \dots (2)$$

- 주 : K1, K2, K3, K4, K5, K6 : 운전상수
- τ_1, τ_2, τ_3 : 시정수
- $T_{avg}, T^{oavg}, T_{avg}^{nom}$: 냉각재 평균온도 (측정치,보상치,정격치)
- P, P^{nom} : 가압기 압력 (측정치,정격치)
- $f_1(\Delta D), f_2(\Delta D)$: 증성자속 출력함수
- ΔT : 정격 출력에서의 냉각재 온도차

이를 실현하기 위하여 고리 1 호기 원자로 보호계통의 경우 디지털 신호처리 모듈 (Foxboro Spec 200/Spec 200 Micro)을 사용하여 회로를 구성하였으며 고리 2 호기의 경우에는 아날로그 신호처리 모듈(Westinghouse 7300 series)을 사용하였다. 각각에 대한 회로 구성 내용은 그림 1, 2 와 같다.

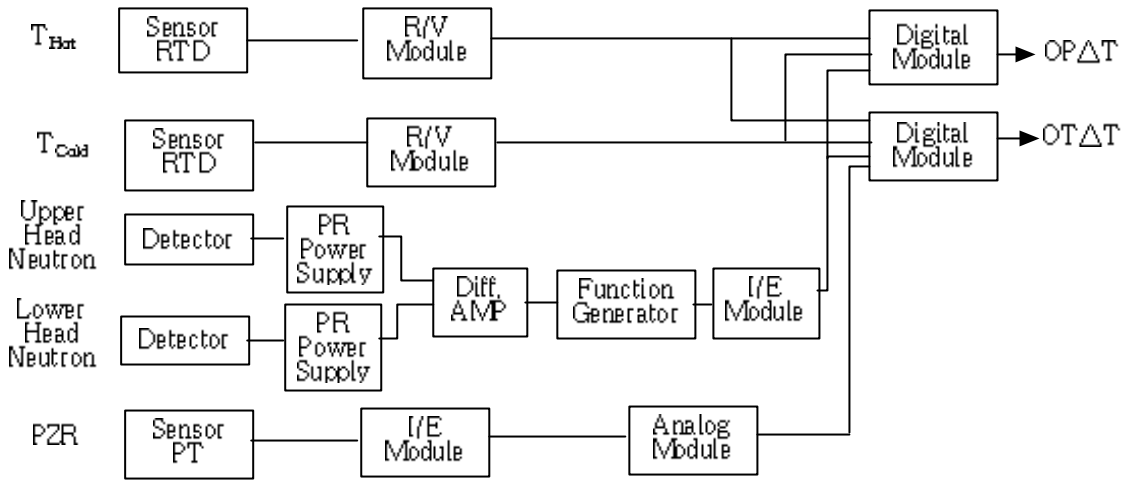


그림 1. 고리 1호기 OPDT & OTDT 채널 구성도

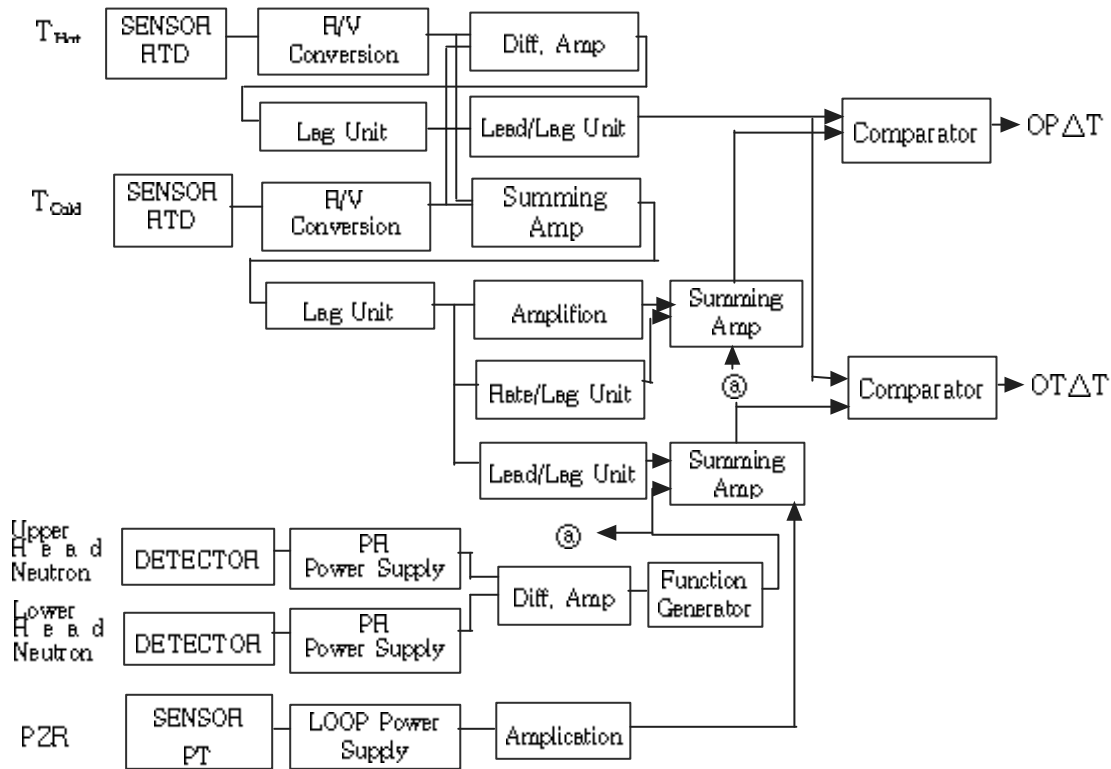


그림 2. 고리 2호기 OPDT & OTDT 채널 구성도

2 계측 불확실도 계산내용

2.1 계측오차 특성 및 오차 결합방법

일반적으로 계측오차의 내용은 발전소 정상운전 중 예상되는 정상상태 오차와 발전소 사고 기간 중 예상되는 과도상태 오차로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 과도 상태 오차에 대한 기초자료 수집이 불가능한 관계로 정상상태 오차만을 검토

하였다. 한편, 정상상태 계측오차의 발생 내용은 원인에 따라

- (1) 계측канал 교정에 의한 것
- (2) 운전조건 및 주변환경 변화에 의한 것
- (3) 운전시간 경과에 의한 것
- (4) 공급전원의 변화에 의한 것으로 구분될 수 있으며

설치위치에 따라

- (1) 신호감지기 및 전송기에 의한 것
- (2) 공정 신호처리 캐비닛에 의한 것으로 구분될 수 있다.

원자력 발전소 안전관련 계측시스템의 설정치 선정에 관한 국제 기술기준인 ISA-67.04-1994 에서는 계측오차의 결합 방법으로 오차의 발생 내용이 독립적이며 동일 변수에 대한 오차 분포가 정상분포를 지니는 경우에는 각 각의 오차를 통계적 합산(Square-root sum-of-square)하고 그 외의 경우에는 각 각의 오차를 산술적으로 합산(Algebraic sum)하도록 권고하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 각각 독립적인 오차 발생원이 직렬로 연결되는 경우에는 통계적 합산을 취하고 오차 발생원이 종속적 관계로 연결되는 병렬결합의 경우에는 산술적 합산을 취하였다. 또한 개별오차의 특성을 고려하여 다음과 같은 오차 결합 방법을 적용하였다.

$$MCU = [(PM)^2 + (CU)^2 + (CT)^2 + (CD)^2 + (PSE)^2]^{1/2} + (MTE) \quad (3)$$

주 : MCU = 계측канал 최대오차

PM = 공정계측오차

CU = 설계사양오차(교정오차)

CT = 운전온도 변위

CD = 운전시간 변위

PSE = 공급전압변위

MTE = 측정 및 시험장치 고유오차

위 식에 나타낸 각 각의 오차 내용을 설명하면 다음과 같다.

- 1) 공정계측 오차는 계측기기의 측정치가 피 측정 매체 온도의 비 균질성, 밀도의 변화 등으로 실제 값과 다르게 나타나는 오차를 의미한다.
- 2) 설계사양 오차(교정오차)는 계측기기의 제작 및 교정 과정에서 발생하는 것으로 계측 기기 자체의 정확도를 의미한다.
- 3) 운전온도 변위는 계측기기의 운전 조건이 기준 온도에서 이탈하는 경우에 계측 회로 내부 소자의 특성이 변화하여 발생하는 오차를 의미한다.
- 4) 운전시간 변위는 계측기기의 장시간 계속 운전으로 계측회로 내부 소자의 운전 특성이 변화하여 발생하는 오차를 의미한다.
- 5) 공급전압 변위는 전원 공급기 출력전압이 변화함으로써 나타나는 계측회로 출력 변화분을 의미한다.
- 6) 측정 및 시험장치 고유오차는 현장 보수요원이 계측канал 교정을 위하여 사용하는 표준 장비 자체의 정확도를 의미한다.

2.2 가정사항 및 입력 데이터 선정

계측채널 최대 오차를 계산하기 위한 입력 데이터는 현장 기기 사양서와 인허가 심사과정에서 제출된 사업자 보고서, 현장 교정 절차서 등을 조사하여 정리하였다. 신호 감지기/전송기 및 신호 처리기의 최대 시간변위(드리프트)는 18개월 주기로 교정이 이루어지는 것을 가정하였으며 신호 감지기/전송기의 측정치는 발전소 핵연료 교체기간 중에 측정된 값을 가정하고 신호 처리기의 측정치는 제어실 설치 위치의 기준온도(70°F)에서 측정된 값을 가정하였다. 또한 신호 전송기의 온도변위는 격납 용기 내의 예상 최대 온도변화 범위인 50 °F~150 °F 를 가정하였으며 신호 처리기의 최대온도 변화 범위인 40 °F~120 °F 를 가정하였다. 이외에도 신호 처리기의 공급전원 변위는 각각의 신호 처리기 정상 공급 직류전원이 ±10 % 변화하는 것을 가정하였다. 이에 따라 구하여진 예상 최대 오차값은 표 1, 표 2에 나타내었다.

표 1. 고리 1호기 OPDT & OTDT 계측채널 최대오차

오차발생부위	세부오차내용	적용채널	
신호감지기/전송기	신호감지기/전송기 오차	± 0.51%	OPDT & OTDT
	신호감지기/전송기 오차	± 0.74%	OPDT & OTDT
	신호감지기/전송기 오차	± 2.0%	OPDT & OTDT
	신호감지기/전송기 오차	± 5.0%	OPDT & OTDT
	신호감지기/전송기 오차	± 0.25%	OPDT & OTDT
	신호감지기/전송기 오차	± 1.73%	OPDT & OTDT
	신호감지기/전송기 오차	± 0.64%	OPDT & OTDT
	신호감지기/전송기 오차	+ 13.5%	OPDT & OTDT
	신호감지기/전송기 오차	- 5.0%	OPDT & OTDT
	공정신호처리캐비닛	신호처리캐비닛 오차	± 0.61%
신호처리캐비닛 오차		± 0.30%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.61%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.30%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.12%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.30%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.12%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.30%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.25%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.2%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.25%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.20%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 1.0%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.25%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 1.0%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.25%	OPDT & OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.5%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.5%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.5%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.5%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.25%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.25%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.25%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.2%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.1%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.1%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.2%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.1%	OTDT
신호처리캐비닛 오차		± 0.1%	OTDT
측정 및 시험장비 고유오차		± 0.15%	OPDT & OTDT

OTDT 설정치는 T_{avg} , T'_{avg} , ΔI , P_{PR} 신호를 조합하여 생성한다. 또한 ΔI 출력신호는 상부 증성자 속 검출기 신호와 하부 증성자 속 검출기 신호를 조합하여 생성한다. 이와 같은 관계를 이용하면 고리 1, 2 호기 OPDT & OTDT 채널의 오차 결합 내용은 다음과 같은 수식적 표현으로 나타낼 수 있다.

고리 1호기의 경우 :

$$(CU)_{OPDT} = (CU)_{T_B} + (CU)_{T_C} + (CU)_{\Delta I} \dots \dots \dots (3)$$

$$(CU)_{OTDT} = (CU)_{T_B} + (CU)_{T_C} + (CU)_{\Delta I} + (CU)_{P_{PR}} \dots \dots \dots (4)$$

고리 2호기의 경우 :

$$(CU)_{OPDT} = (CU)_{\Delta T} + (CU)_{T_{avg}} + (CU)_{T'_{avg}} + (CU)_{\Delta I} \dots \dots \dots (5)$$

$$(CU)_{OTDT} = (CU)_{\Delta T} + (CU)_{T_{avg}} + (CU)_{\Delta I} + (CU)_{T'_{avg}} + (CU)_{P_{PR}} \dots (6)$$

$$(CU)_{\Delta I} = (CU)_{LHV} + (CU)_{LHV} \dots \dots \dots (7)$$

본 연구에서는 식 (3)~(7)을 이용하여 다음 3 가지 경우에 대한 고리 1, 2 호기 OPDT & OTDT 계측채널 최대 오차 계산을 수행하였다.

- Case (1) 모든 계측오차 발생 요인을 고려한 경우
- Case (2) 신호 감지기/전송기 공정계측 오차를 제외시킨 경우
- Case (3) 신호 감지기/전송기 오차를 제외시킨 경우
- Case (4) 신호 감지기/전송기 오차, 온도 변위 및 전압 변위를 제외시킨 경우

위의 4 가지 계산 조건 중 (3)항의 조건은 발전소 계기 교정 절차서에 의해 요구되는 측정오차 허용 범위를 가정한 것이며 (4)항의 조건은 실제 현장 계기 교정 시 나타나는 측정치에 대한 오차 범위를 가정한 것이다. 각 각에 대한 계산 결과는 표 (3)에 나타내었다. 표(3)에 나타낸 바와 같이 디지털 계측모듈의 채택으로 인하여 Case (3) OPDT 채널의 경우 고리 1호기 계측채널의 오차 값이 고리 2호기 계측채널에 비하여 약 3.05 % 정도 감소하였으며 OTDT 채널의 경우 0.49 % 정도 감소하였음을 알 수 있다. 이와 같이 OPDT 채널과 OTDT 채널의 오차 감소율이 크게 다르게 나타나는 주 요인은 고리 1 호기 설비개선 범위에서 OPDT 채널 구성이 OTDT 채널 구성에 비하여 더욱 단순화되었으며 가압기 압력 채널을 구성하는 아나로그 모듈 오차가 상대적으로 크게 작용하는 것으로 평가되었다.

또한 각 각의 계측채널 오차값을 온도로 환산하여 생각하면 Case (2), (3)의 경우 고리 1, 2호기 Delta T Span (150 % Reactor Power) 값이 대략 100 °F(55.55 °C) 인 점을 고려할 때 고리 1호기 OPDT 채널/OTDT 채널의 오차 값은 각각 ±4.68/±7.08 °F(±2.60/3.93 °C) 와 ±3.89/±5.40 °F(±2.16/±3.00 °C) 이며 고리 2호기

OPDT 채널 / OTDT 채널의 오차 값은 각각 $\pm 9.47/\pm 9.13$ °F($\pm 5.26/\pm 5.07$ °C)와 $\pm 6.93/\pm 5.89$ ($\pm 3.85/\pm 3.27$ °C) 임을 알 수 있다.

표 3. 고리 1,2호기 OPDT & OTDT 계측 불확실도

호기별	Case 별	OPDT 채널(%span)	OTDT 채널(%span)
고리 1호기	Case (1)	+15.10/-15.10	+28.81/-20.65
	Case (2)	+4.68/-4.68	+7.08/-7.08
	Case (3)	+3.89/-3.89	+5.40/-5.40
	Case (4)	+3.22/-3.22	+4.30/-4.30
고리 2호기	Case (1)	+20.02/-20.02	+30.45/-22.22
	Case (2)	+9.47/-9.47	+9.13/-9.13
	Case (3)	+6.93/-6.93	+5.89/-5.89
	Case (4)	+4.65/-4.65	+3.87/-3.87

3. 결론

본 연구를 통하여 고리 1,2 호기 OPDT/OTDT 채널의 계측 불확실도를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 첫째, 계측 불확실도에 가장 영향을 주는 인자는 신호감지기/전송기의 공정계측 오차이며 전체 오차 구성의 약 60 ~ 70 % 를 점유한다.
- 둘째, 공정계측 오차를 제외한 순수 계측 불확실도 중 신호감지기/전송기 오차는 전체 오차 구성의 약 20 ~ 30 %를 점유한다.
- 셋째, 고리 1 호기 계측채널의 경우 디지털 설비개선의 결과로 OPDT/OTDT 채널에 대하여 3.0 % / 0.5 % 공정신호 처리 캐비닛 오차가 감소되었으며 이는 약 43 % / 8 % 상대 감소율에 해당한다.
- 넷째, 앞에서 제시한 4 경우의 계산 결과를 분석함으로써 개별 오차의 상대적인 오차 점유율을 확인할 수 있으며 이를 통하여 계측 불확실도 최소화 방안을 추정할 수 있다.

4. 참고 문헌

1. ANSI/ISA-S67.04-PART II-1994 Methodologies for the Determination of Setpoints for Nuclear Safety-Related Instrumentation
2. WCAP-11273 Rev.1 Westinghouse Setpoint Methodology for Protection Systems, Westinghouse Electric Corporation
3. Equipment Reference Manual, Process Instrumentation and Control, Westinghouse Electric Corporation
4. Design Documents, Instrument Uncertainty and Setpoint Calculation for Kori 1 Nuclear Power Plant, KOPEC