

총채널 불확실도를 적용한 원전 노심출구온도의 운전가능 판정기준

성제중[†] · 윤덕주 · 하상준

한수원(주) 중앙연구원

(2014. 7. 2. 접수 / 2014. 11. 24. 수정 / 2014. 12. 9. 채택)

Operating Criteria of Core Exit Temperature in Nuclear Power Plant with using Channel Statistical Allowance

Je Joong Sung[†] · Yoon Duk Joo · Sang Jun Ha

Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd

(Received July 2, 2014 / Revised November 24, 2014 / Accepted December 9, 2014)

Abstract : Nuclear power plants are equipped with the reactor trip system (RTS) and the engineered safety features actuation system (ESFAS) to improve safety on the normal operation. In the event of the design basis accident (DBA), a various of post accident monitor(PAM)systems support to provide important details (e.g. Containment pressure, temperature and pressure of reactor cooling system and core exit temperature) to determine action of main control room (MCR). Operator should be immediately activated for the accident mitigation with the information. Especially, core exit temperature is a critical parameter because the operating mode converts from normal mode to emergency mode when the temperature of core exit reaches 649 °C. In this study, uncertainty which was caused by exterior environment, characteristic of thermocouple/connector and accuracy of calibrator/indicator was evaluated in accordance with ANSI-ISA 67.04. The square root of the sum of square (SRSS) methodology for combining uncertainty terms that are random and independent was used in the synthesis. Every uncertainty that may exist in the hardware which is used to measure the core exit temperature was conservatively applied and the associative relation between the elements of uncertainty was considered simultaneously. As a result of uncertainty evaluation, the channel statistical allowance (CSA) of single channel of core exit temperature was +1.042%Span. The range of uncertainty, -0.35%Span (-4.05 °C) ~ +2.08%Span(24.25 °C), was obtained as the operating criteria of core exit temperature.

Key Words : core exit temperature, channel statistical allowance, square root of the sum of square, operating criteria

1. 서론

원자력발전소는 안전성 향상을 위해 정상운전의 경우 원자로 트립계통 (RTS: Reactor Trip System), 공학적 안전설비 작동계통 (ESFAS: Engineered Safety Features Actuation System)이 작동되고 있으며, 사고기간 중에는 주제어실 운전원에게 중요한 발전소 운영변수인 격납 건물 압력, 원자로 냉각재계통 고온관/저온관 온도 및 압력, 노심출구온도 등을 제공하는 사고후 감시(PAM: Post Accident Monitor) 계측설비를 가지고 있다.

이 설비는 설계기준사고시 안전기능을 수행하는 안전계통 자동제어가 동작하지 않을 때 운전원이 수동으로 조치를 취하기 위한 기본정보를 제공한다. 특히 원자력발전소 기능회복 절차 중 부적절한 노심냉각조치

에서는 노심출구온도가 649°C 이상이고 2차 감압이 부적절한 노심냉각 증상을 완화할 수 없을 때 원자로냉각재펌프의 재기동을 요구하므로 노심출구온도는 설계기준사고발생시 비상운전모드로 전환되는 기준온도를 제시하는 중요한 변수이다. 노심출구온도와 관련된 사고후 감시계측설비로서 열전대는 부적절한 노심냉각 발생여부의 확인과 노심온도의 장기간 감시를 위해 노심출구에 설치되어 있으며, 가동원전의 안전운영을 위해 열전대의 온도지시에 의한 노심출구온도 지시설정의 주기적 점검을 수행하여 운전가능성을 판정하고 있다.

본 논문에서는 원전 노심출구온도 측정시 영향을 주는 외부환경, 열전대 특성, 연결선, 교정기 및 지시계 등의 정확도 및 개별적 불확실도 영향요소간의 연관관

[†] Corresponding Author : Je Joong Sung, Tel : +82-42-820-5257, E-mail : sinclair@khnp.co.kr

Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., 70 1312-gil Yuseong-daero Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

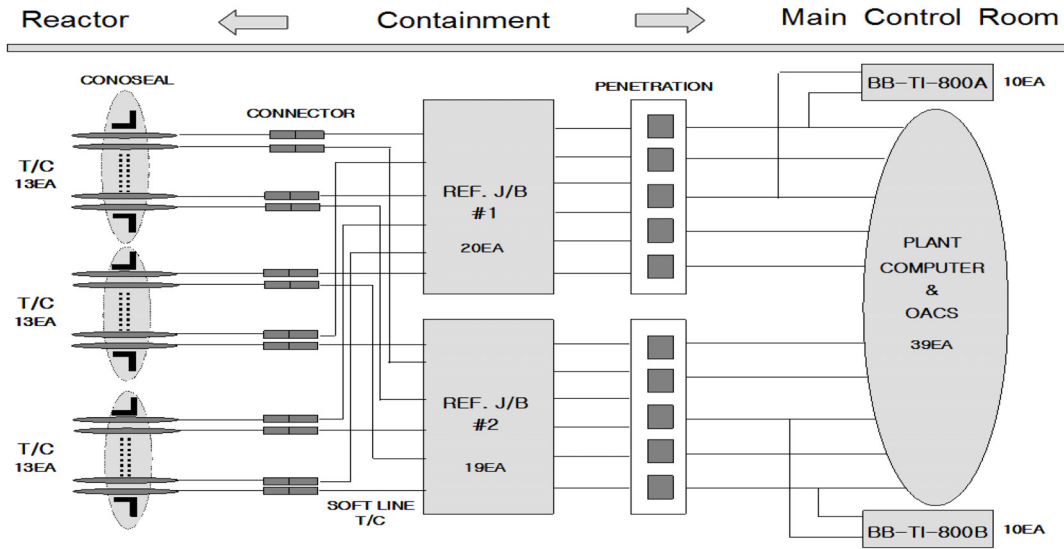


Fig. 1. Schematic of core exit temperature measurement system.

계를 고려한 총채널 불확실도 (CSA : Channel Statistical Allowance)를 평가하여 노심출구온도 지시 판정기준의 기술적 근거를 제시하였다.

총채널 불확실도 평가는 원자력발전소 고유설계특성 및 미국 원자력규제기관 (NRC)의 규제지침 (Regulatory Guide) 1.105 인허가 요건에 의해 위임된 ANSI-ISA 67.04 기술기준을 적용하였다. 기본 합성방법으로 계측영역에 존재하는 각각의 독립적인 불확실도가 동일한 수준의 확률을 포함하는 전체 불확실도에 포함되도록 합성하는 방법인 제곱합의 제곱근(SRSS: Square Root of the Sum of Square)기법을 사용하였다.

원전 노형에 상관없이 적용가능한 SRSS기법은 계측 영역에 개별적으로 존재하는 불확실도로서 계측에는 영향이 있으나 계측기와 직접적 관련이 없는 불확실도 요소, 전송기와 전송기 교정시 존재하는 불확실도 요소, 기록계와 기록계 교정시 존재하는 불확실도 요소 및 기타 환경에 의한 불확실도 요소 등을 제곱합의 제곱근으로 합성하여 계측채널에 포함된 총 불확실도를 보수적으로 평가한다¹⁾.

총채널불확실도 평가를 위해 설계기준사고 동안 허용제한값의 초과를 방지하기 위해 보호계통을 동작시키는 값으로서 교정주기 사이에 발생하는 교정 허용오차 및 계기 드리프트의 반영 등, 노심출구온도 실측을 위한 열전대 및 전자카드와 같은 하드웨어에 존재할 수 있는 모든 불확실도를 보수적으로 적용함과 동시에 불확실도 영향요소간의 연관관계를 고려하였다.

불확실도 평가결과 격납건물 비정상시 노심출구온도(지시범위 : 93.3℃~1,260℃)의 총채널 불확실도 및

지시범위 내에서의 출구온도 허용치를 도출하였다. 분석된 결과를 통해 신뢰성이 향상된 원자력발전소 노심출구온도 지시계의 운전가능성 판정기준을 제시하였으며, 계측기 정기점검수행시 평가된 운전가능성 판정기준을 통하여 운영측면에서의 원자력발전소 안전성 향상이 기대된다.

2. 노내계측계통의 열전대 특성 및 구성

원자력발전소에 설치된 노내계측계통은 노내 반경방향 출력분포의 불균일성 확인 및 제어봉 정렬의 이상유무 등의 부적절한 노심냉각상태 감시를 위해 노심가열의 정도를 평가한다. 부적절한 노심냉각상태 감시는 NUREG 0718 (Rev. 2)의 스리마일아일랜드(TMI)원전사고 이후 조치항목에 따라서 운전원이 사고후 노심냉각 상태를 감시하기 위해 필요하며 이용가능한 정보로는 원자로용기수위, 포화여유도, 노심출구온도 등이 있다. 특히 노심출구온도는 냉각재가 핵연료집합체를 빠져나갈 때 노심출구의 냉각재온도를 측정함으로써 노심가열의 정도를 측정한다. 노내계측계통은 Fig.1과 같이 1차측 격납건물 내부에 K-type (Chromel-Alumel) 열전대와 안내관, 열전대 연장케이블, 커넥터 및 저온기준함(Reference Junction Box)이 설치되어있으며, 2차측 주제어실(MCR)에는 10채널을 가진 노심출구온도 지시계 (BB-TI-800A, BB-TI-800B) 2개 트레인 등으로 구성되어있다. K-type 열전대는 +쪽에 Cr을 약 10%포함한 Ni-cr 합금(chromel)과 -쪽에 Al과 Mn을 포함한 Ni 합금(Alumel)을 사용한 열전대이다. 미국 호스킨스사에

Table 1. Specification of core exit thermocouple

Thermocouple	Specification
Model	Framatome ANP (K-type)
Temperature Range	0.0 ~ 1,200 °C
Calibration Accuracy	0.0 ~ 375 °C : ±1.5°C 375 ~ 1,200°C : 0.4%Span
Operating Pressure	173bar
Operating Temp.	370°C

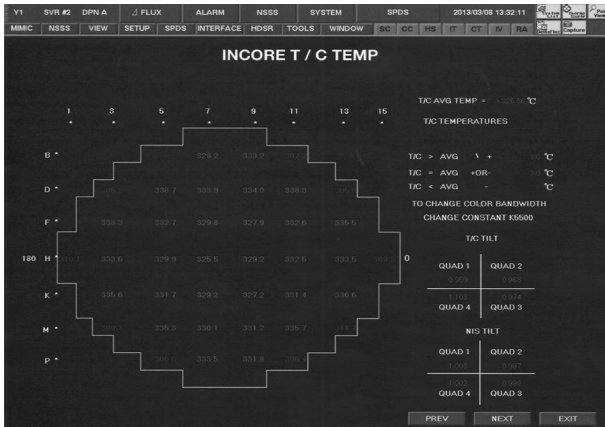


Fig. 2. Distribution of core temperature.

서 1906년 A.L.Marsh에 의해서 개발되어 현재 공업용 열전대로서 가장 넓게 사용되고 있으며 신뢰성이 높다. 약1,200°C의 고온까지 사용 가능하고 기전력특성의 직선성이 양호하며 내열내식성이 높은 것이 특징이다. 일반적으로 2개의 채널로 분리하여 설치된 노심출구온도 측정용 K-type 열전대는 온도범위 0~1,200°C, 사용스팬 1,166.7°C이고 상세사양은 Table.1에서 제시된다. 원자력발전소 노내계측계통에서 열전대의 노심 내부 위치는 Fig.2와 같으며 주 제어실에서 감시가능하다. 다 채널의 노심출구온도 평균온도와 표준편차를 계산후 평균온도 교정 및 유효성검사를 통해 선정된 대표적 노심출구온도를 설계기준사고시 비상운전모드 전환시의 기준온도로 사용한다.

3. 총채널 불확실도 요소

본 연구에서 노심출구온도 실측을 위해 구성된 열전대, 케이블 및 지시계 등 같은 하드웨어에 존재할 수 있는 모든 불확실도 생성요소를 보수적으로 다음과 같이 적용하였다.

3.1 공정측정 정밀도 및 1차요소 정밀도

공정측정 정밀도 (PMA: Process Measurement Accuracy)는 계측기 채널 판독의 정확도에 직접적인 관련을 가지고

있으나 계측기와 관련없는 영향에 의한 오차로서 센서를 제외한 공정변수 측정시의 불확실도이다. 온도측정시 열성층화 현상(Thermal stratification) 및 수위 측정 시의 변화에 따른 영향이 이에 해당되며 대구경 배관에서의 온도성층, 배관 또는 용기에서의 유체 밀도 변화 등이 해당된다. 공정측정 정밀도 변수는 통계적으로 독립항으로 취급하고 변수의 무작위 또는 바이어스 여부는 개별 평가결과에 의한다. 노심출구 온도측정을 위한 열전대 온도측정계통은 노심상부에 위치하여 직접적으로 노심출구유량과 접하므로 열전대의 공정측정 정밀도는 고려대상에서 제외된다.

1차요소 정밀도(PEA: Primary Element Accuracy)는 계측기 구성요소간의 비선형성에 따른 오차로서 통계적으로 독립항으로 취급된다. 열전대는 온도차에 대응하는 열기전력이 측정온도에 비례하므로 불확실도 요소로서 1차요소 정밀도는 고려하지 않는다.

3.2 전송기 불확실도

센서 기준정밀도(SRA: Sensor Reference Accuracy)는 기준 운전조건에서 계기가 사용될 때 오차가 초과하지 않을 한계를 나타낸 수나 양으로 정의되며 선형성(Linearity), 히스테리시스(Hysteresis) 및 재현성(Repeatability) 오차로 구성되며 열전대는 해당없다.

센서 교정정밀도(SCA: Sensor Calibration Accuracy)는 교정방법이나 교정으로부터 야기되는 계측채널 또는 계측기 정확도에 영향을 끼치는 불확실도로서 교정장비의 사용과 관련한 불확실도 및 오차 등을 고려하였다.

센서의 모든 교정절차는 조건들의 특정 집합(입력 및 출력)을 사용하여 계기 조정을 모니터하기 위한 측정 및 시험 장비를 요구하므로 입력측 시험장비 정밀도와 출력측 시험장비 정밀도에 대한 SRSS기법으로 센서 측정 및 시험장비 정밀도 (SMTE: Sensor Measurement & Test Equipment accuracy)를 계산한다²⁾. 센서 리프트(SD: Sensor Drift)는 입력, 환경 또는 부하에 상관없이 일정기간에 걸쳐 발생하는 계기성능의 변화이다. 드리프트는 계기 루프의 모든 기기에 독립적으로 발생하며 온도, 방사능 및 습도와 같은 환경조건은 계기 드리프트의 크기에 영향을 끼치지 않는다. 특정 계기 드리프트 데이터는 전형적으로 계기 제작자 및 교정이력 데이터 검토를 통해서 얻을 수 있으며 본 논문에서는 웨스팅하우스 원전에서 보수적 열전대의 드리프트 값을 사용하였다.

센서 정압효과(SPE: Sensor Pressure Effects)와 센서 온도효과(STE: Sensor Temperature Effects)는 각각 운전압력의 변화와 기준온도에서 변할 수 있는 최대운전온

도를 반영하는 것이다. 노심출구온도 측정용 열전대 설치위치는 압력영향이 적으며 온도영향은 통상적 50°F의 운전온도 변화를 반영하므로 비정상상태 측정 열전대는 해당되지 않는다.

센서의 니켈-크롬 합금배열(Chromel Ordering)에 관련된 불확실도는 ORNL(Oak Ridge National Lab)연구결과에 따라 K-type 열전대가 200°C에서 600°C사이의 온도에 노출되었을 때 발생하는 니켈과 크롬원자의 배열에 의한 오차를 고려한다³⁾. 니켈-크롬 합금배열은 보수적으로 대표온도에 대해서 원자배열이 되며 이때 오차는 양의 값이고 크기는 노출온도 및 원자배열시간에 따라 상이하다. 사고후 감시기간에도 이 원자배열에 의한 오차는 반영되며 이러한 경우 275°C의 온도에서 원자배열에 의한 오차는 1.6%이고 이 값은 200°C 이상까지 감소하게 된다. 통상적인 니켈-크롬 원자배열에 의한 오차의 경우 저온기준함이 격납건물 내부에 있으면 약 371°C Span (700°F Span)에서는 1.09%, 약 649°C Span (1200°F Span)에서는 1.36% 이다. 반대로 저온기준함이 격납건물 외부에 있으면 약 371°C Span에서는 0.79%, 약 649°C Span에서는 1.15%이다. 본 연구에서는 저온기준함이 격납건물 내부에 있는 경우를 기준으로 불확실도를 평가하였다.

열전대 보상도선의 감마가열(Gamma Heating) 및 열방사능조사(Thermal Irradiation) 영향에 의한 불확실도가 고려되어야 하며 열전대 보상도선에 끼치는 열방사능조사에 의한 보상도선의 불확실도는 무시 가능하나 감마가열에 의한 오차는 +1.0°C이다⁴⁾.

3.3 기록계 불확실도

기록계 불확실도는 원자력발전소 노내 핵계측 열전대 온도지시계통 정비절차서의 지시계 교정정확도,



Fig. 3. Indicators of core exit temperature.

Table 2. Specification of core exit indicator

Item	Model	Range	Minimum Interval	Indicator Accuracy
Core Exit T/C Indicator	Beckman Industrial. 610 Digital panel indicator	-299.9~2,503.5°F	0.1 digits	±1.0%

지시계 시험장비 정확도 및 지시계의 최소 눈금간격을 이용한 판독오차를 전체 온도측정범위 93.3~1,260°C에 대하여 보수적으로 적용하였다. Fig.3은 10개채널 노심출구온도 지시계인 BB-TI-800A 및 BB-TI-800B로서 2개 트레인으로 구성되어 주제어실에 위치하며 설계기준사고시 비상운전모드 전환기준인 노심가열정도를 지시한다. 세부사양은 Table 2.와 같다.

3.4 기타

격납건물 내에 있는 연결케이블, 커넥터 및 저온기준함 등에 대한 정상상태 및 비정상상태의 오차가 고려되었다. K-type 열전대 오차는 정상상태에서 ±2.2°C이며 비정상상태 조건에서는 커넥터종류와 수량에 따라 다르다⁵⁾.

4. 총채널 불확실도 및 판정기준

4.1 총채널 불확실도 평가

본 방법론은 불확실도 요소를 통계적, 기능적으로 독립적인 그룹의 조합으로 합성하였으며, 이에 대한 자세한 설명은 ANSI-ISA67.04 기술기준에 명시되어 있다. 센서와 지시계의 교정정밀도 및 드리프트 불확실도는 정규분포에서 무작위하다고 가정하였을 때 모든 불확실도 요소가 독립적인 경우의 단일채널 불확실도는 다음과 같다.

$$CSA = \sqrt{PMA^2 + PEA^2 + SRA^2 + SCA^2 + SPE^2 + STE^2 + SMTE^2 + SD^2 + RCA^2 + RMTE^2 + RD^2 + RTE^2 + EA^2 + Bias}$$

$$= 0.899\%Span$$

그러나 원자력발전소에서 계측기가 사용되는 가혹한 외부환경에서 열전대 성능 및 지시계 불확실도는 반드시 연관되어야 한다. 실제 노심출구온도 불확실도는 비독립적인 불확실도 요소를 산술적으로 합성하여 보수적으로 취급하였으며 독립적인 항들과 제곱합에 대한 SRSS기법으로 합성하였다. 센서 교정정밀도 및 센서 드리프트와 센서 측정 및 시험장비 정밀도, 지시계 교정정밀도 및 지시계 드리프트와 지시계 측정 및

시험장비 정밀도 등 불확실도 영향요소간의 연관관계를 고려한 단일채널 불확실도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 CSA &= \sqrt{PMA^2 + PEA^2 + SRA^2 + (SCA + SMTE)^2 + SPE^2 + (SD + SMTE)^2 + (RCA + RMTE)^2 + (RD + RMTE)^2 + RTE^2 + EA^2} \\
 &= 1.042\%Span
 \end{aligned}$$

Fig. 4에서는 단일채널 불확실도 요소간 연관관계가 없는 경우(A)와 열전대 연관성만 고려된 경우(B), 지시계 연관성만 고려된 경우(C) 및 두가지 연관성이 모두 고려된 경우(D)의 단일채널 불확실도와 해당 범위에서의 온도환산 절대값을 비교하였다. 열전대 연관성이 고려된 경우(B) 단일채널 불확실도가 지시계 연관성만 고려된 경우(C)의 단일채널 불확실도에 비해 0.07%Span(0.82℃) 증가된 것은 열전대 연관성에 의한 불확실도 영향이 더 커짐을 보여준다. 두가지 연관성이 모두 고려된 경우(D)의 단일채널 불확실도 1.042%Span(12.16℃)는 불확실도 요소간 연관관계를 고려하지 않은 경우(A)의 단일채널 불확실도 0.899%Span(10.49℃)보다 0.143%Span 증가되어 열전대 측정범위 내에서의 온도차이는 1.67℃이다. 이것은 단일채널에서 불확실도 요소간의 연관성이 고려된 노심출구온도의 측정값은 기본적으로 1.67℃의 오차범위를 필수적으로 포함함을 의미한다. 사고후 감시계측설비로서 지시계는 각각 채널수 10개를 포함하고 있으므로 격납건물 노심출구온도 지시계 운전가능성 판정기준은 노심출구온도 판정시 관련되는 불확실도 영향을 채널수에 따라 고려하였으며 증가 및 감소방향으로 평가하였다. 증가방향의 총채널 불확실도로서 10채널 불확실도는 단일채널 불확실도와 열전대의 니켈-크롬 합금배열 영향, 열전

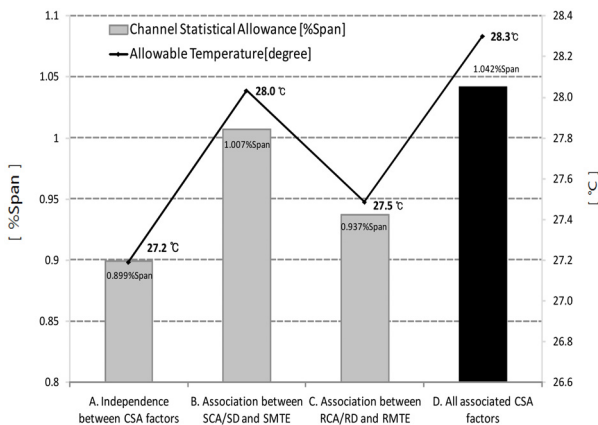


Fig. 4. Comparison with CSA and temperature obtained from independent CSA factors and associative CSA factors

대의 감마가열 및 열방사전 조사 영향, 바이어스 모두의 합으로 계산되어 +2.08%Span이며 감소방향 10채널 불확실도는 다음과 같다⁶⁾.

$$CSA(-) = \frac{CSA}{\sqrt{\text{채널수}-1}} = -0.347\%Span$$

따라서 격납건물 비정상시 노심출구온도 기록계 총채널 불확실도는 -0.35%Span ~ +2.08%Span, 해당온도는 -4.05℃ ~ 24.25℃(온도환산 절대값 28.3℃)이다. 또한 10개채널 총채널 불확실도의 허용온도는 연관성이 고려되지 않은 경우(27.19℃)와 고려된 경우(28.3℃)의 허용온도차이는 1.11℃였으며 증가방향과 감소방향으로 불확실도가 분산되어 단일채널 불확실도 보다는 감소되었다.

4.2 노심출구온도 운전가능성 판정기준

사고후 감시계측설비의 운전가능성이란 설계기준사고 발생시 발전소 상태를 평가하고 조치하기 위해 선별된 다양한 운전변수들이 유용하고 충분한 정보를 제공할 수 있음을 의미한다.

운전변수중 하나인 노심출구온도는 대표값이 649℃ 이상으로 증가시 비상운전모드로 전환되는 기준온도를 제시하는 중요한 변수로서 지시설정치의 주기적 정기점검을 수행하여 운전가능성을 판정하고 있다.

현재 운전가능성은 트레이넬 10개 채널 지시설정치의 주기적 정기점검을 수행후 지시치가 기본적 불확실도를 고려하여 설계문서에서 제시된 지시계의 정밀도인 ±4.0%Span(46.67℃)이내이면 운전가능하다고 판정되나 연관된 불확실도를 보수적으로 고려할 때 판정기준은 Table 3.과 같이 개선되었다.

Table 3.은 열전대의 온도지시에 의한 노심출구온도 지시설정치의 주기적 정기점검 수행을 위한 운전가능성의 세부 판정기준을 제시한다. 여기서, a는 현주기 측정값이고 a'는 이전주기 측정값이다. 현주기와 이전주기의 측정값 차이가 10개채널 불확실도 범위 -4.05 ~ 24.25℃ (온도환산 절대값 28.3℃)내에 존재하면 해당 노심출구온도 지시는 유효하다고 판단하며 이는 기

Table 3. Criteria of core-exit temperature indicator

Content	Evaluation Results
Allowable Criteria	$ a - a' < CSA \text{ range}$ (a: Present reading, a' : Last reading)
CSA	(-0.35~ +2.08%Span) (-4.05~24.25℃ = 28.3℃)

존 판정기준의 오차범위 46.67℃에서 18.37℃ 감소된 값이다.

따라서 개선된 노심출구온도 지시계측설비의 운전가능성 판정기준을 감소함으로써 원자력발전소 운전안전성은 개선될 수 있다고 생각된다.

5. 결론 및 고찰

본 논문에서는 노심출구온도 측정시 영향을 주는 총채널 불확실도를 평가하고 노심출구온도 지시 판정기준을 제시하였다.

원전 고유설계특성으로 노심출구온도 측정용 열전대 정확도, 교정기 정확도, 연결케이블, 지시계 및 계측 외부환경 등을 적용하여 ANSI-ISA 67.04 기술기준에 따라 불확실도를 평가하였다. 제곱합의 제곱근 기법인 SRSS기법을 사용하여 불확실도 요소의 연관성이 고려된 10개채널의 총채널 불확실도를 계산하였고, 그 결과를 적용하여 노심출구온도 지시계의 운전가능성 판정기준을 다음과 같이 제시하였다.

1) 노심출구 온도지시계의 총채널 불확실도는 노심출구온도 지시에 관련된 불확실도 생성요소로서 공정 측정정밀도 및 1차요소 정밀도, 센서기준정밀도, 센서 교정 정밀도 및 센서측정/시험장비 정밀도 등의 전송기 불확실도요소, 지시계 판독오차(readability), 교정정밀도 및 시험장비 정밀도 등의 기록계 불확실도, 연결케이블, 커넥터, 저온기준함 등에 대한 영향과 불확실도 연관관계를 모두 고려하여 SRSS기법 및 산술합으로 평가 되었다. 열전대 불확실도 요소와 지시계 불확실도 요소의 연관관계가 모두 고려된 경우 총채널 불확실도는 가장 보수적이었으며 평가된 격납건물 비정상시 지시범위 93.3℃ ~ 1,260℃에서 노심출구온도 총채널 불확실도는 $-0.35\%Span (-4.05^{\circ}C) \sim +2.08\%Span (24.25^{\circ}C)$ 이다.

2) 노심출구 온도지시계 판정기준은 지시계의 현주기와 이전주기의 지시차가 계산된 총채널 불확실도의 온도환산 절대값 28.3℃보다 작을 경우 채널이 운전가능하다고 할 수 있으며 기존 허용오차범위를 18.37℃ 감소시켜 계측신뢰성을 향상시켰다.

본 논문에서는 사고후 감시계측에 필수적인 노심출구온도에 대하여 불확실도 요소별 연관관계에 따라 총채널 불확실도를 평가하고 노심출구온도 지시계의 운전가능 판정기준을 제시하였다. 제시된 판정기준에 따라 노심출구온도 주기별 교정이 수행된다면 안전계측 지시계통의 정밀도 유지 및 신뢰성 확보로 원자력발전소 운전안전성이 향상될 것으로 기대된다.

References

- 1) ANSI/ISA-67.04-Part-1994, "Setpoint for Nuclear Safety-Related Instrumentation", American National Standard, 1995.
- 2) Scientific Apparatus Makers Association Standard PMC-20.1-1979, 1979.
- 3) Results of Thermocouple Calibration in a Pulsed Reactor", G.Dau, R.Bourassa, ANS Transactions, Vol. II, No.1, pp.141~142, 1968.
- 4) T.G. Kollie et al., "Temperature Measurement Errors with Type K(Chromel vs. Alumel) Thermocouples due to Short-ranged Ordering in Chromel", ORNL(Oak Ridge National Lab)-TM-4862, 1975.
- 5) Omega Complete Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia, Omega Engineering, 1995.
- 6) I. H. Kim, J. Y. Lee and J. K. Suh, "Evaluation of Pressurizer Water Level Uncertainty for Ulchin Units 1,2 due to Thermal-hydraulic Operating Condition Change", Proceeding of Korean Society of Pressure Vessel and Piping, 2010.