'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

월성 1 호기 국부과출력보호 트립계통 모사 불확실도 및 오차 검증 [중성자속 형태오차 분야]

Wolsong 1 ROPT Simulation Uncertainties and Errors Verification [flux shape errors]

이성덕

한국전력공사 월성원자력본부
경북 경주시 양남면 나아리 260

요 약

월성 1 호기에 새로 설치된 노내 신형검출기가 설계 분석에서 예측한 대로 반응하는지 여부를 확인하고 또 국부과출력보호 트립설정치 모사 불확실도에 대한 새로운 평가자료를 제공하기 위해 원자로 섭동시험을 수행하였다. 섭동시험에서 얻은 자료를 통해 극한 연료관과 보호 검출기를 계산하고 최종적으로 4 가지 중성자속 형태오차를 평가하였다. 이 평가의 주 목적은 설계자가 제공한 중성자속 형태오차를 실제 월성 1 호기 노심상태에서 도출된 값과 비교, 분석하므로서 설계자가 제공한 값이 실제 노심상태와 얼마나 일치하는가를 역으로 검증하여 원자로의 안전성 확보 및 설계자료의 신뢰성을 확인하기 위함이다. 이 새로운 평가를 통해 트립설정치 재설계에 사용된 설계 모사값이 신뢰할 수 있으며 실제 신형검출기 반응특성과 일관됨을 확인할 수 있었다.

Abstract

Perturbation tests were performed to verify if new in-core flux detectors installed in Wolsong 1 respond well as expected in design analysis and to give new evaluation data for the simulation uncertainties of Regional Overpower Protecting Trip Setpoints. With data obtained from the tests, limiting channels and protecting detectors were calculated and finally 4 flux shape errors were evaluated. The main purpose of this evaluation is to verify inversely if how the data from designer correspond with actual Wolsong 1 core through the comparison with flux shape errors given by designer and data from actual Wolsong 1 core, and ultimately to verify reactor safety and the reliability of design data. This new evaluation showed that designed simulation values used in ROPT setpoints re-design can be trusted and correspond with actual detectors' response.

1. 개 요

월성 1 호기 노내 중성자속 검출기 전량교체와 관련하여 새로 설치된 신형검출기가 ROPT[1] 분석에서 예측한 대로 반응하는지 여부를 확인하고 또 Simulation Uncertainties 에 대한 새로운 평가자료를 제공하기 위해 재기동중 원자로 섭동시험(Perturbation Test)를 수행하였다. 이 새로운 평가를 통해 ROP Trip 설정치 재설계에 사용된 모델들의 신뢰성과 나아가 월성 1 호기의 실제 원자로 상태와의 일관성을 확인해 볼 수 있었다.

2. 중성자속 형태오차

ROPT 불확실도 분석(TTR-289 Part 3)에서 다양한 Source 에서 파생되는 노물리 계산상 불확실도가 평가되었으며 이 오차들은 [flux shape errors] 항목에 그룹화 되어있다.(표 1)
이 불확실도는 다음 4 가지로 분류된다.

❑ Detecter Random Uncertainty

검출기 위치에서의 예측된 Flux 변화 불확실도

❑ Channel Random Uncertainty

예측된 연료관 출력변화 불확실도

❑ Common Random Uncertainty

모든 검출기신호 또는 모든 연료관 출력변화에 공통으로 적용되는 불확실도

❑ Bias(Systematic) Error

모든 검출기 또는 연료관에 공통되는 non-random 값(고정값)

또한 중성자속 불확실도는 다음과 같은 Source 를 가진다.

■ Simulation Error

⧫ Pure Simulation Error

섭동모사 자체에 관련된 것으로 Time-Averaged Burnup 을 사용하는 모델에 의해 파생된다.

⧫ Ripple Superposition

연료교체에 의한 Ripple 효과를 반영함. 즉 과도상태 중성자속과 연료관 출력분포는 시간평균 섭동에 대한 중성자속과 연료관 출력분포의 합과 초기 실제분포(Instantaneous Burnup)의 합으로 주어짐

⧫ Unanalyzed shape variations

설계기준에 의한 반응도 제어장치 변화 즉, Xe transient, AVZL 변화등에따른 오차

■ Change due to boiling

원자로 트립시 연료관에는 기준조건과 비교하여 더 많은 비등이 발생하며 이는 연료관 출력계산에서 오차를 유발함.

---

[1] Regional Overpower Protection Trip System(원자로 제 1,2 정지계통중 Neutron Overpower 관련설정치)

■ Lead-Cable contributions

Lead-Cable 이 검출기 신호에 미치는 오차영향

■ Off-Nominal Core conditions

ROPT 적용범위에 영향을 미칠 수 있는 노심상태, 즉 비정상적인 연료교체, 감속재 독물질 변화, 출력변동에 따른 Pu, Sm 등의 불안정등에 따른 오차영향

월성 1 호기의 [flux shape errors]는 캐나다 Pt.Lep 와 G-2 발전소에서 수행한 불확실도 계산결과를 토대로 한 가중평균(Weighted Average)값이다.
상기 Error Source 중 비등에 따른 오차영향은 Perturbation 시험이 비등이 없는 45%FP 에서 수행되었으므로 배제되었으며 나머지 오차항목의 불확실도 평가는 TTR-289 Part 3 (W1) APPD " D "에 의거 수행하였다.

3. 섭동 시험 (Perturbation Tests)

3.1 시험항목 결정기준

섭동시험은 신형검출기 교체후 재기동중 45%FP 에서 수행되었으며 시험항목은 ROPT 설계기준 섭동항목 232 Set 중 다양한 반응도 제어기구 변화로 노내 모든 위치에서의 검출기 영향을 평가할 수 있고 또 적절한 통계자료를 얻을 수 있도록 아래와 같이 8 개 항목이 선정되었다.

[시험항목 및 순서]

❶ Draining of LZC #10 from 50% : ⇨ ROP Simulated Case #33
❷ Draining of LZC #5 from 50% : ⇨ ROP Simulated Case #28
❸ MCA Rod #1 Half In : ⇨ ROP Simulated Case #229
❹ MCA Rod #4 Half In : ⇨ ROP Simulated Case #232
❺ ADJ Bank #1 Fully Out : ⇨ ROP Simulated Case #204
❻ ADJ Bank #2 Fully Out : ⇨ ROP Simulated Case #207
❼ ADJ Bank #3 Fully Out : ⇨ ROP Simulated Case #210
❽ ADJ Bank #4 Fully Out : ⇨ ROP Simulated Case #213

3.2 시험수행 개요

시험은 45%FP AVZL 50%(Nominal core)에서 시작하여 상기 시험순서대로 첫번째 LZC #10 Draining 에서 마지막 ADJ Bank #4 인출까지 약 13 시간이 소요되었다. 시험조건 만족 및 수행을 용이하게 하기위해 Gd 이 적절히 주입, 제거되었으며 각 상태에서 최소한 30 분 안정상태를 유지후 자료를 수집하였다.
주요 수집자료는 다음과 같다.(매 시험 전후마다)

- 380 개 연료관 출구온도

- Zone Deviation
- SDS #1 Pt. 검출기 출력
- SDS #2 Pt. 검출기 출력
- 102 개 Vanadium 검출기 출력

시험수행과정에서 MCA 를 노심중앙에 위치시키기 위해 지시계상으로 65%까지 삽입하였는데 이때 MCA sheave 의 turn difference 를 잘못 계산하여 실제로는 노심중앙보다 약 73cm 더 깊이 삽입된 것으로 나중에 판명되었으며 이로 인해 실제 출력분포 및 검출기 반응거동이 모사값과 약간 불일치하게 나타난 것으로 분석되었다. 실제 지시계상으로 53% 위치가 노심중앙과 일치하는 것으로 확인되었다.

4. 분석방법

4.1 연료관출력

Nominal Case 및 Perturbation Cases 에 대한 연료관출력을 수집된 연료관 입출구 온도를 가지고 COMPTH Code 로 계산하였다.

$$CP_{COMPTH}(m,k) = F_{NOR}(k) \times W(m) \times \Delta h(m,k)$$

∴ $F_{NOR}(k)$: Normalization Factor
$W(m)$: 연료관 냉각재 유량
$\Delta h(m,k)$: 연료관 엔탈피 변화량

4.2 극한 연료관(Limiting Channel)의 결정

ROPT 계통은 어떤 제어상실시 핵연료가 Dry-out 되기전에 원자로를 정지시키기 위해 설계되었다. ROPT 검출기 위치 및 트립설정치를 결정하기 위해 임계 연료관출력(CCP[2]) 의 예측이 필요하며 현 ROPT 설정치는 연료 피복재위에 간헐적인 Film-Boiling 이 시작되는 OID[3] CCPs 에 근거한 값이다. 이것은 98%의 신뢰도를 가지고 있으며 신뢰도 98%는 첫번째 Trip channel 이 동작하지 않음을 가정(2 out of 2 Trip concept)하여 계산된다. 어떤 비정상적인 원자로상태(k)에서 Dry-out 이 발생하는 첫번째 연료관은 임계 연료관 출력(CCP)에 가장 가까운 출력을 가진 연료관이 될 것이며 이는 가장 낮은 임계 출력비(CPR[4])를 가지게 될 것이다.

$$CPR(m,k) = \left[\frac{CCP(m,k)}{CP(m,k)} \right]_{MIN}$$

∴CCP(m,k) ; 원자로상태(k)에서의 연료관(m)의 임계출력

---

[2] Critical Channel Power : 피복재위의 Dryout 또는 연료중심선 용융이 시작되는 한계출력
[3] Onset of Intermittent Dryout
[4] Critical Power Ratio : 임계출력에 대한 실제출력의 비(여유도)

CP(m,k) ; 원자로상태(k)에서의 연료관(m)의 실제출력

이 가장 낮은 임계출력비를 가지는 연료관을 극한연료관(Limiting Channel) 이라고 하며 원칙적으로 어떤 상태에서 극한연료관은 단 1 개 존재한다. 그러나 실제 출력계산에 사용된 변수들의 불확실도와 특히 연료교체에 따른 톱니형태(국부 연소도효과, The effect of fuelling ripple)의 출력분포로 인해 한 개의 극한연료관을 확인하기는 어렵다. 따라서 이런 불확실도를 감안하여 최저 임계출력비의 104%(잠재적인 극한연료관의 Ripple 효과 3%와 예상된 CPR random error 2.6%의 RMS) 이내의 출력을 갖는 연료관들이 극한연료관으로 구분된다.

임계출력은 TTR-289 Part 2에서 얻어지며 임계출력중 정상유량이 흐르는 중앙연료관들은 1.1% 낮게 그리고 저유량지역의 외부연료관에 대해서는 1.7% 높게 교정되었다.
이는 CCP 계산에 사용된 NUCIRC(Version 1.501) 계산에서 중앙연료관의 출력과 유량에 대해서는 Over-estimation 하였고 외부연료관에 대해서는 Under-estimation 한데 따른 보상임.

4.3 검출기 신호

각각의 Perturbation 시험에서 측정된 SDS #1 및 SDS #2 의 개별 검출기값은 다음과 같이 재계산되었다.

$$\Delta\phi_{meas}(j,k) = \frac{\phi_{meas}(j,k)}{\phi_{meas}(j,n) * \frac{P(k)}{P(n)}}$$

∴ $*\phi_{meas}(j,n)$; 출력 및 Nominal 상태에 대해 Normalize 한 값
$\phi_{meas}(j,k)$; k 시험에 대한 검출기 측정값
P(k) ; k 시험시 원자로출력
P(n) ; 원자로 bulk 출력(100%FP)

4.4 보호 검출기(Protecting detector) 결정

원자로를 정지시키기 위해서는 ROPT 검출기중 적어도 2 찬넬에서 최소 1 개 이상의 검출기가 트립설정치에 도달하여야 한다. 그러나 실제 ROPT 분석에서는 첫번째 Trip 찬넬은 동작하지 않는 것으로 가정하므로 원자로정지를 위해서 각 찬넬에서 최소 1 개 검출기가 트립설정치에 도달해야 한다. 원자로상태(k)에서 각 찬넬중 트립설정치에 가장 가까운 검출기를 그 찬넬에 대한 보호검출기라고 한다. 검출기 신호의 불확실도를 감안하여 최소 Trip 여유도의 103%(1σ) 이내의 값을 가지는 검출기는 모두 보호검출기로 분류된다.

$$MD(j,k) = \frac{\text{Trip Setpoint}(i)}{\text{Detector Reading}(i,k)}$$

∴ MD ; Trip Margin

보호검출기 결정에 사용된 3%값은 Ref.1 에 근거하며 트립설정치는 표 2 와 같이 4 개 그룹으로 나뉘어져 있다.
(실제 월성 1 호기에서는 4 개 그룹중 가장 낮은 값인 123.98%를 단일 트립설정값으로 적용하고 있음)

4.5 연료관 과출력인자에 대한 Simulation 불확실도 계산

어떤 연료관에서의 출력증가는 그 연료관의 공칭출력과 비교되며 원자로상태(k)에서 과출력인자는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta CP(m,k) = \frac{CP(m,k)}{CPo(m,k)}$$

측정된 과출력과 모사된 과출력의 비는 연료관출력의 모사 불확실도를 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$R_{CP}(m,k) = \left(\left[\frac{\Delta CP_{meas}(m,k)}{\Delta CP_{sim}(m,k)} \right]_{LIM} - 1 \right) * 100$$

원자로상태(k)의 극한연료관에 대한 Rcp 의 평균값 및 표준오차($\sigma_{Rcp}(k)$)는 각각 연료관 출력계산의 Systematic 오차 및 Random 오차를 나타낸다.

4.6 검출기 위치에서의 중성자속 증가에 대한 모사 불확실도 계산

원자로상태(k)일 때 검출기위치(j)에서 중성자속 증가는 기준 원자로상태의 동일 중성자속과 비교되며 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\phi(j,k) = \frac{\phi(j,k)}{\phi_o(j,k)}$$

측정된 중성자속 증가와 모사된 중성자속 증가의 비는 각 검출기 위치에서의 중성자속 모사 불확실도를 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$R_\phi(j,k) = \left(\left[\frac{\Delta\phi_{meas}(j,k)}{\Delta\phi_{sim}(j,k)} \right]_{prot} - 1 \right) * 100$$

원자로상태(k)일 때 보호검출기에 대한 $R_\phi(j,k)$ 평균값 및 표준편차($\sigma R_\phi k$) 각각 중성자속 계산에 있어 Systematic 오차 및 Random 오차를 나타낸다. $R_\phi(j,k)$ 평균값 및 표준편차는

SDS#1 및 #2에 대해 각각 계산되어 지므로서 두 계통의 거동이 동일한 가를 확인할 수 있다.

4.7 Simulation 오차 계산

ROPT Simulation Error는 원자로상태(k)에서의 측정값과 모사값의 비에 대한 차이이며 다음과 같이 계산된다.

$$E_{sim} = \frac{[(\phi/\phi_o)_{prot} / (CP/CP_o)_{Lim}]_{Meas}}{[(\phi/\phi_o)_{prot} / (CP/CP_o)_{Lim}]_{Sim}} - 1$$

$$= \frac{[(\phi/\phi_o)_{prot} / (CP/CP_o)_{Lim}]_{prot}}{[(CP/CP_o)_{Meas} / (CP/CP_o)_{Sim}]_{Lim}} - 1$$

$$= ((R_\phi(j,k) / R_{CP}(k)) - 1) * 100$$

∴ $\phi = \phi(j,k)$ = 원자로상태(k)에서의 검출기(j) 중성자속

$\phi_o = \phi_o(j)$ = Nominal 원자로상태에서 검출기(j) 중성자속

$CP = CP(m,k)$ = 원자로상태(k)에서 연료관(m)출력

$CP_o = CP_o(m)$ = Nominal 원자로상태에서 연료관(m)출력

" Prot " = Protecting detectors

" Lim " = Limiting channels

실제로는 각 연료관에 대한 Simulation error를 구하는 대신에 극한연료관에서 과출력의 평균오차에 관해서만 Simulation error가 계산된다.

마지막으로 원자로상태(k)에 대한 평균 Simulation error는 위에서 계산된 모든 보호검출기에 대한 Simulation error의 평균값으로 계산된다.

각 Case에 대한 Simulation error는 SDS#1 및 #2에 대해 각각 계산되어 두 계통사이에 어떤 Systematic error가 없음이 확인되어야 하며 차이가 없는 경우 두 값은 평균되어 최종적으로 한 개의 값이 얻어진다.

5. 분석 결과

8개의 섭동시험에서 분석된 결과는 표 3 과 같으며 계산에 사용된 방법은 상기 4항에서 언급한 바와 같이 각 Case별로 검출기 불확실도 ($R_{\phi 1}(j,k)$, $R_{\phi 2}(j,k)$), 연료관출력 모사 불확실도(Rcp(j,k)), Simulation Error(Esim)의 평균값 및 표준편차가 계산되었으며 표 4 는 최종적으로 전체 섭동시험에 대한 결과를 현재 ROPT 설정치계산에 사용된 불확실도와 비교하였다. 앞서 언급했듯이 섭동시험당시 MCA가 요구치보다 더 깊이 삽입되었으며 이로 인해 실제 출력분포 및 검출기 반응거동이 모사값과 차이가 있을 것으로 예상되었다

분석결과, MCA#1 결과는 수용할 수 있었으나 MCA#4의 결과는 다른 시험결과와 비교해 볼 때 차이가 커 전체 평균값 계산에서 배제키로 하였다. 실제로 MCA 의 경우는 모사하기가 쉽지 않으며 G-2에서도 MCA#1 의 시험결과가 다른 시험결과와 차이가 커 평균값 계산시 배제한 적이 있다.

5.1 연료관출력 불확실도

표 3, 4 에서 보면 각 원자로상태(k)의 극한연료관에 대한 Rcp 의 평균값 및 RMS($\sigma_{Rcp}(k)$)가 나타나 있으며 전체 Perturbation case에 대한 극한연료관의 평균값과 RMS 값이 나타나 있다. 표에서 보듯이 전체 case의 평균 RMS 값(MCA#4 배제)은 ±1.09% 로 모사값 ±1.06% 과의 차이가 거의 없으며 전체 RMS의 표준편차 ±0.87%보다 훨씬 작게 나타났다. G-2와 Pt.Lep의 1992 년도 시험경우 각각 ±0.93%, ±1.42%로 발전소별로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 일반적으로 이 값은 약 ±1.20% 수준에 있음이 관측된다. 이 결과는 ROPT 분석에 사용된 연료관출력 불확실도가 신뢰성있는 값임을 보여주며 실제 교체된 검출기의 반응특성이 예측치와 일관됨을 알 수 있다.

5.2 정지계통 검출기 불확실도

표 3, 4 에서 보면 각 원자로상태(k)의 SDS#1 및 SDS#2 계통의 보호검출기에 대한 평균값 ($R_\phi(j,k)$) 및 표준편차($\sigma R_\phi k$)가 나타나 있으며 전체 Perturbation case에 대한 보호검출기의 평균값과 RMS 값이 나타나 있다. 표에서 보듯이 전체 case의 평균 RMS 값은 SDS#1 ±1.62%, SDS#2 ±2.12%로 두 계통의 결과가 큰 차이가 없으므로 두 계통의 값을 평균하여 사용할 수 있다. 따라서 전체 정지계통 검출기 평균 불확실도는 ±1.87%로 모사값 ±1.89%과의 차이가 거의 없으며 전체 RMS 의 표준편차보다도 훨씬 작게 나타났다. G-2와 Pt.Lep의 경우는 각각 ±0.96%, ±1.91%로 나타났으며 이 값은 일반적으로 ±1.98% 수준에 있다.

이 결과는 ROPT 분석에 사용된 정지계통 검출기 불확실도가 신뢰성있는 값임을 보여주며 실제 교체된 검출기의 반응특성이 예측치와 일관됨을 알 수 있다.

5.3 Simulation Ratio 의 불확실도와 Errors

Simulation Error는 본질적으로 중성자속 변화에 대한 연료관출력 변화의 비(Ratio)에 의해 주어진다. 또한 주어진 원자로상태(k)에서 요구되는 검출기 설정치는 중성자속 변화에 대한 연료관출력 변화의 비에 직접적으로 비례한다. 따라서 이 비에서의 계통적 오차는 실제적으로 검출기 트립설정치의 계통적 오차를 나타낸다.

표 3, 4 에서 보면 각 원자로상태(k)에서 SDS#1 및 SDS#2 계통의 Simulation Ratio Error (Esim1, Esim2) 와 전체 Perturbation case에 대한 계통별 평균값과 RMS 값이 나타나 있다. Simulation Ratio Error(Esim1, Esim2)중 일부 cases의 값이 약간 negative 로 나타나고 있는데 이는 비정상적인 결과이며 비보수적이다. MCA 의 경우는 Rod 삽입 위치상의 차

이로 설명될 수 있으나 나머지 경우는 Simulation 상의 ratio overestimation 에 의한 것인지 아니면 시험수행 및 분석 과정의 Uncertainties 에 의한 것인지 또는 실제 검출기의 반응특성의 차이에서 기인하는 것인지 이번 자료만으로는 정확한 원인을 추정하기 어려우며 추후 재분석이 필요한 것으로 판단된다.

그러나 전체 Perturbation case 에 대한 평균 계통적오차(Systematic Error)는 SDS#1 +0.95%, SDS#2 +2.03%로 positive 한 결과로 나타나고 있으며 SDS#2 계통값이 약간 크게 나타났다. 두 계통의 Bias 평균값은 +1.49%로 모사값 –0.06%에 비해 positive(+) 한데 이는 조정봉 인출운전에 따른 xenon 차이(불안정)에 기인하며 보다 보수적인(안전한) 값이다. 이는 현행 ROP 설정치를 약 1.5%정도 상승시킬 수 있음을 의미한다. 조정봉 인출운전 중 일부 높은 오차값(>+3)을 배제한 평균값은 +0.24%로 모사값과 큰 차이를 보이지 않는다. (모사값 역시 높은 +오차값은 배제된 값임)

G-2 와 Pt.Lep 의 경우는 각각 +1.43%, +0.25% 로 나타났으며 이 값은 일반적으로 +0.97% 수준에 있다. 각 원자로상태(k)에서 SDS#1 및 SDS#2 계통의 Simulation Ratio Error (Esim1, Esim2)의 표준편차는 Common-random Uncertainty(s_{CR})로 검출기와 연료관의 전체 불확실도를 포함한다.

표 3, 4 에서 SDS#1 및 SDS#2 의 s_{CR} 는 각각 ±1.92%, ±1.84%로 거의 비슷하게 나타났으며 평균값은 ±1.88%로 모사값(±1.34%)과의 차이가 ±0.54%로 약간 크게 나타났으며 G-2 와 Pt.Lep 의 ±1.14%, ±1.13% 보다도 높은 수준에 있다. 이 값은 전통적으로 ±2.3% 수준에 있으며 정상적으로는 ±1.3% 이하 수준에 있는 것으로 관측된다..
이런 차이가 발생한 것은 연료관 출력의 낮은 예측값이나 아니면 검출기 측정의 (+) bias 또는 두가지 모두에 의한 영향으로 분석되는데 이는 당시 선정된 원자로상태 case 의 종류와 각각의 시험수행 당시의 원자로 조건, 예를 들면 Xe 상태(원자로 안정도), 자료수집의 신뢰성 등과 연료관 출력 계산의 오차등에 의한 복합적인 영향으로 판단된다. 결론적으로 일부 cases 의 값이 약간 이상거동을 보이기는 하나 전체 Simulation Ratio 의 불확실도(s_{CR}) 및 Errors 결과는 새로 교체된 검출기의 반응특성이 예측치와 일관됨을 보여주고 있으며 이는 현행 ROPT 분석에 사용된 정지계통 검출기의 모사 불확실도가 신뢰성있는 값임을 확인한 결과로 판단된다.

6.0 결 론

신형검출기 교체에 따른 ROPT Uncertainties 와 Errors 설계값과 실제 원자로에서 수행한 섭동시험에서 도출된 분석값을 비교해 본 결과 일부 개별 cases 의 값이 약간 비정상적이긴 하나 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었으며 이는 신형검출기 분석에 사용된 설계값이 신뢰할 수 있으며 실제 신형검출기 반응특성이 Simulation 값과 일관됨을 알 수 있었다.

일부 개별 cases 의 이상거동은 시험조건이나 자료수집등의 불안정상태에서 기인한 것으로 추정되며 추후 추가적인 시험을 통해 문제점이 확인될 수 있을 것으로 판단된다.
국내 중수로에서 처음으로 수행된 ROPT Uncertainties 와 Errors 분석방법 및 분석결과는 설계자의 Simulation 값을 현장에서 실제 노심상태를 가지고 역으로 검증할 수 있는 기술을 확보 함으로서 자체 기술수준 및 원자로의 안전성을 제고하였다는 데서 그 의의를 찾을 수 있으며 향후 국내 중수로의 ROPT 운전 불확실도를 자체적으로 평가, 비교할 수 있는 기술축적 및 개발에 좋은 토대가 될 수 있을 것으로 사료된다. 끝.

[참고문]

1. Gentilly-2 Technical Report(G2-RT-91-32)
   "ROP Trip Setpoints : Verification of Simulation Uncertainties"
2. "Design and Assessment of the Replacement ROPT Systems for Wolsong-1"
   TTR-289 Part 1 (W1) Rev. 1 by F.A.R.Laratta, C.M.Bailey and G.H.J. Gomes
3. "Critical Channel Power Assessments for CANDU 6 ROPT"
   TTR-289 Part 2 Rev. 1 by D.N.Mori, D.McAllister, and M.R.Soulard
4. " ROPT Error Analysis for Wollsong-1"
   TTR-289 Part 3 (W1) Rev. 1 by C.M.Bailey and G.H.J. Gomes
5. "Reactor Physics Data for Design and Assessment of the CANDU 6 ROPT"
   TDAI-440 Part 1 : Simulation and Processing
   by C.M.Bailey, D.A.Jenkins, M.Beaudet and F.A.R.Laratta
6. "Reactor Physics Data for Design and Assessment of the CANDU 6 ROPT"
   TDAI-440 Part 2 Rev 1 : Tables of Detector Responses
   by F.Laratta, D.A.Jenkins, M.Beaudet, M.A.Milley and M.Shad
7. "Reactor Physics Data for Design and Assessment of the CANDU 6 ROPT"
   TDAI-440 Part 3 Rev 1 : Channel Reference-Power and Overpower Distributions
   by D.A.Jenkins, M.Beaudet, D.B.Buss, M.A.Milley and M.Shad

표 1. Wolsong1 Flux-Shape Errors

	Detector Random	Channel Random	Common Random	Bias Error
Simulation Error Pure Simulation Error Ripple Superposition Unanalyzed Shape Variations	± 1.88	± 1.06	± 1.07	+ 0.14
Change due to Boiling				– 0.2
Lead-Cable Contributions	± 0.2		± 0.1	– 0.2
Off-Nominal Core			± 0.8	
Combined Uncertainties	**± 1.89**	**± 1.06**	**± 1.34**	[5] **- 0.06**

표 2. ROPT Detectors and Setpoints in Wolsong 1

SDS#1				SDS#2			
Detector	HSP-1 Setpoints	HSP-1 Setpoints	HSP-1 Setpoints	Detector	HSP-1 Setpoints	HSP-1 Setpoints	HSP-1 Setpoints
1D	133.90%	120.51%	90.92%				
2D	124.89%	112.40%	84.80%				
3D	124.89%	112.40%	84.80%	1G	133.90%	120.51%	90.92%
4D	124.89%	112.40%	84.80%	2G	133.90%	120.51%	90.92%
5D	124.89%	112.40%	84.80%	3G	126.20%	113.58%	85.69%
6D	124.89%	112.40%	84.80%	4G	126.20%	113.58%	85.69%
7D	123.98%	111.58%	84.18%	5G	124.89%	112.40%	84.80%
8D	123.98%	111.58%	84.18%	6G	124.89%	112.40%	84.80%
9D	123.98%	111.58%	84.18%	7G	123.98%	111.58%	84.18%
10D	123.98%	111.58%	84.18%	8G	123.98%	111.58%	84.18%
11D	123.98%	111.58%	84.18%				
12D	123.98%	111.58%	84.18%				
1E	124.89%	112.40%	84.80%				
2E	124.89%	112.40%	84.80%				
3E	124.89%	112.40%	84.80%	1H	126.20%	113.58%	85.69%
4E	124.89%	112.40%	84.80%	2H	126.20%	113.58%	85.69%
5E	124.89%	112.40%	84.80%	3H	124.89%	112.40%	84.80%
6E	124.89%	112.40%	84.80%	4H	124.89%	112.40%	84.80%
7E	124.89%	112.40%	84.80%	5H	124.89%	112.40%	84.80%
8E	123.98%	111.58%	84.18%	6H	124.89%	112.40%	84.80%
9E	123.98%	111.58%	84.18%	7H	123.98%	111.58%	84.18%
10E	123.98%	111.58%	84.18%	8H	123.98%	111.58%	84.18%
11E	123.98%	111.58%	84.18%				
1F	126.20%	113.58%	85.69%				
2F	126.20%	113.58%	85.69%				
3F	124.89%	112.40%	84.80%	1J	126.20%	113.58%	85.69%
4F	124.89%	112.40%	84.80%	2J	126.20%	113.58%	85.69%
5F	124.89%	112.40%	84.80%	3J	124.89%	112.40%	84.80%
6F	124.89%	112.40%	84.80%	4J	124.89%	112.40%	84.80%
7F	124.89%	112.40%	84.80%	5J	124.89%	112.40%	84.80%
8F	123.98%	111.58%	84.18%	6J	124.89%	112.40%	84.80%
9F	123.98%	111.58%	84.18%	7J	123.98%	111.58%	84.18%
10F	123.98%	111.58%	84.18%	8J	123.98%	111.58%	84.18%
11F	123.98%	111.58%	84.18%				

[5] Perturbation test 가 비등이 없는 45%FP 에서 수행되었으므로 비등에 의한 연료관 출력 변화값은 제외되었음.

표 3. WOLSONG 1- SIMULATION UNCERTAINTIES CALCULATED FROM PHYSICS TEST

	Rcp(k)avg	Rcp(k)rms	Rψ1(k)avg	Rψ1(k)rms	Rψ2(k)avg	Rψ2(k)rms	esim1(k)avg	esim2(k)avg
ZONE#10 DRAIN	0.66	0.63	-0.86	0.93	0.25	1.46	-1.51	-0.41
ZONE#5 DRAIN	3.49	1.64	5.31	2.78	5.19	4.18	1.75	1.64
MCA #1 65% IN	3.36	2.8	3.18	3.01	4.02	2.06	-0.18	0.64
MCA #4 65% IN	11.36	2.13	9.74	2.22	6.95	3.36	-1.45	-3.96
ADJ BANK#1 OUT	2.42	0.57	0.99	0.79	2.63	2.3	-1.4	0.2
ADJ BANK#2 OUT	2.54	0.14	3.74	1.03	6.6	2.39	1.17	3.96
ADJ BANK#3 OUT	2.93	0.38	6.08	1.55	7.32	0.63	3.06	4.26
ADJ BANK#4 OUT	2.71	1.47	6.57	1.24	6.72	1.8	3.76	3.9
AVERAGE	3.68	**1.22**	4.34	**1.69**	4.96	**2.27**	**0.65**	**1.28**
RMS	3.01	0.88	3.12	0.81	2.34	1.03	**1.97**	**2.62**
*AVERAGE	2.59	**1.09**	3.57	**1.62**	4.68	**2.12**	**0.95**	**2.03**
*RMS	0.87	0.87	2.53	0.84	2.37	1.01	**1.92**	**1.84**
* MCA #4 CASE **제외**								

표 4. Comparison of Uncertainties

	DETECTOR RANDOM	CHANNEL RANDOM	COMMON RANDOM	BIAS ERROR
W1 DESIGN ('96 AECL)	± 1.89	± 1.06	± 1.34	– 0.06
Wolsong 1 Test Result (1996)	± **1.87**	± **1.09**	± **1.88**	+ **1.49**
Gentilly-2 Test Result (1992)	± 0.96	± 0.93	± 1.14	+ 1.43
Pt.Lep Test Result (1992)	± 1.91	± 1.42	± 1.13	+ 0.25