

Relaxed Axial Offset Control Strategy 의 울진 1,2 호기에 적용

박현택, 박재원, 석기영
한국 전력 공사
정선교, 최태영, 손상린
한국 원전 연료(주)

요 약

울진 1,2 호기 RTSR 수행 시 울진 1,2 호기 기존의 ΔI Band 를 해석하기 위해 RAOC 방법을 적용 사고 해석을 수행하였다. 먼저 Xenon reconstruction model 을 사용 축 방향 Xenon 분포를 생산한 다음, 정상 운전 상태와 Condition II 상태에서 생산된 xenon 분포에 의한 축 방향 출력 분포를 사용 F_Q 와 DNBR 을 계산, Design Limit 와 비교 만족하는 새로운 ΔI band 를 결정하였다. 새로운 band 는 기존의 Design Limit 의 변화를 주지 않으면서 울진 발전소 기존의 ΔI band 를 포함하면서 운전상의 유연성 향상을 기하게 되었다.

1. 서론

Westinghouse 형 PWR 에서는 축 방향 출력 분포를 측정된 목표치를 기준으로 하여 일정한 ΔI band (± 5 , 혹은 $+3, -12\%$) 내로 유지시킴으로써 첨두출력 및 DNB 제한치를 충분히 만족시키는 Constant Axial Offset Control(CAOC) Strategy 를 적용하여 왔다. 국내의 Westinghouse 형 PWR 에서도 CAOC 방법에 따라 출력에 관계없이 일정한 ΔI band 내에서만 운전되고 있다. 그러나 PWR 해석 방법론의 개발 및 연료의 개량화는 연료의 건전성을 충분히 보장하면서 CAOC 운전 전략에 비하여 상대적으로 운전의 유연성 향상을 가능하게 하였다. 즉 울진 1,2 호기는 개량형 KNFC 17x17 연료가 새로 장전됨으로써 첨두출력인자의 제한치가 상승하였을 뿐만 아니라, 그림 1[1]과 같이 출력이 87%보다 크면 출력에 관계없이 일정한 ΔI band($\pm 5\%$) 내에서 운전되고 출력이 87%이하에서는 출력에 따라 변화되는 Variable ΔI band 를 적용하고 있는 특이한 형태로서 개량 연료 장전에 따라 출력분포제어 전략의 개선 필요성이 대두되었다. 따라서 본 Paper 에서는 많은 Westinghouse 형 PWR 원전의 축 방향 출력분포제어 전략에 적용하여 그 타당성이 충분히 입증되었을 뿐만 아니라 기존의 울진 1,2 호기 ΔI band 를 충분히 Bounding 할 수 있는 Relaxed Axial Offset Control(RAOC) 방법론을 울진 1,2 호기에 적용하여 울진 1,2 호기의 새로운 ΔI band 를 결정하였다.

2 장에서는 RAOC 방법중 Xenon 분포를 생산하기 위해 사용된 Reconstruction model, RAOC band 계산시 적용되는 Power distribution control 관련 Safety limits, 그리고 Band 크기를 계산하

는 절차에 대하여 설명이 되었으며, 3 장에서는 울진 1,2 호기 Reload Transition Safety Report(RTSR)의 한 부분으로 RAOC 방법론을 적용하여 계산된 새로운 ΔI band 에 대하여 설명되었다.

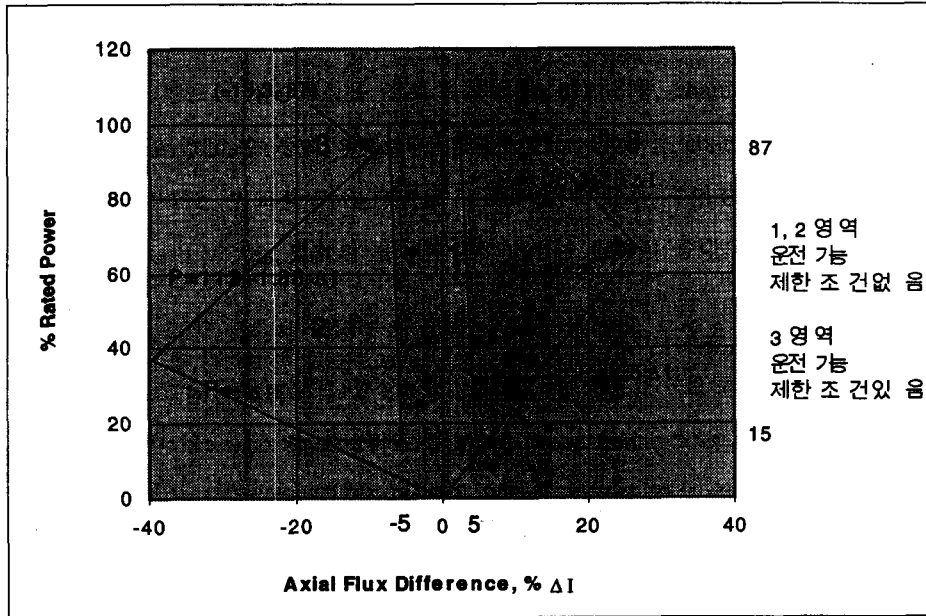


그림 1 울진 1,2 호기 AO

2. RAOC 방법론

2.1 개요

CAOC 방법의 기본 전략은 출력에 관계없이 일정한 ΔI band 내에서 운전되기 때문에, Axial xenon 분포를 제한 시켜 축방향출력분포에 Xenon oscillation 영향을 최소화시키는데 있다. CAOC 방법은 초기에는 $\pm 5\%$ ΔI band 를 적용하였으나, 운전의 여유성 확보를 위해 $+6, -9\%$ 또는 $+3, -12\%$ 와 같이 더 넓은 ΔI band 를 적용하게 되었다. 그러나 그와 같은 Band 하에서도 계산된 F_Q 값은 LOCA F_Q limit 에 충분한 Margin 을 보여 주고 있으며 더 넓은 ΔI band 값이 적용될 수 있다는 가능성을 보여 주고 있다. 그리고 낮은 출력에서는 LOCA limit 는 $F_Q \cdot P$ (=출력)로 표현되므로 낮은 출력에서 F_Q 가 증가하는 것보다 출력이 빨리 감소하므로 낮은 출력에서는 더 넓은 ΔI band 를 가진다. 따라서 Power distribution control 관련 Safety limit 을 만족시키면서 가능한 넓은 ΔI band 를 생산할 수 있는 RAOC 방법론이 적용되었다.

RAOC 방법론이 적용되면 허용된 Band 크기가 기존의 CAOC band 보다 크므로 CAOC 적용 시 사용된 해석 방법은 RAOC band 를 포함하는 충분한 축 방향 Xenon 분포를 생산할 수 없기 때문에 더 이상 적용되지 못하고 새로운 Xenon reconstitution model 을 적용, 축 방향 Xenon 분포를 생산하고 있다. Xenon reconstitution model 은 Fourier Expansion 에 의해 축 방향

Xenon 분포를 생산하는 방법으로, 이 Model 에 의해 생산된 Xenon 분포를 이용 계산된 Axial Offset 과 F_Q 은 실제 값보다 1%이내에서 차이를 보이고 있다.[2]

2.2 ΔI band 크기를 결정하는 주요인자

RAOC ΔI band 크기를 결정하기 위해 정상운전상태와 Condition II 사고 상태에서 사고 해석을 수행한다. 각 상태의 Power distribution control 관련 ΔI Band 를 결정하는 주요인자는 다음과 같다.

정상운전상태시 RAOC ΔI band 을 사용, 생산된 Axial Power Shape 에 의하여 계산된 F_Q 값이 LOCA 해석으로부터 구한 F_Q 값보다는 작고, DNB 값은 Loss Of Flow Accident (LOFA)해석에서 Design Limit DNBR 보다는 커야 한다.

Cooldown, Rod withdrawal, Boron/Dilution 사고와 같은 Condition II 사고 시 RAOC ΔI Band 을 사용, 생산된 Axial Power Shape 에 의하여 계산된 Maximum Peak Linear Power Density 은 Design Limit 값보다 작고, DNB 값이 Design Limit 값보다는 큼을 보여야 한다.

2.3 절차

2.2 절에서 기술한 Design Limits 를 만족시키는 ΔI band 를 구하기 위해서는 다음과 같은 절차를 따른다.

1. CAOC band 보다는 큰 임시 ΔI band 를 결정, BOL, MOL, EOL 에서 Axial Xenon 분포를 변화시켜 축 방향 출력 분포를 생산한다. 임시 ΔI band 가 계산된 ΔI band 를 포함할 수 있도록 가능한 넓은 Band 를 잡는 것이 보수적이다.
2. 임시 ΔI band 가 결정되면 APOLLO/XEFIT code 를이용 임시 ΔI band 내에서 출력을 100-70-30, 100-50-100, 100-30-100 과 같이 변경시키면서 Xenon library 를 생산한다. Xenon library 는 주기초, 주기중, 85%주기말에서 각각 생산한다.
3. 정상운전상태 해석은 다음과 같다.
 - a) Xenon Library 를 이용, 다시 APOLLO code 를 사용 축 방향 출력분포를계산한다.
 - b) VENUS code 는 입력되는 F_{xy} 값과 축방향출력분포값을 이용 LOCA limit 를 만족시키는 ΔI band 를 결정한 후, 그 결과에 대해 LOFA(Loss Of Flow Accident)시 DNB 발생 여부를 확인한다.
4. Condition II 사고 해석은 다음과 같다.
 - a) 사고 유발 전의 정상운전상태 조건에서 APOLLO code 를 사용 관련사고를 유발시킨 후 축방향출력분포를 계산한다.
 - b) VENUS code 를 사용 Maximum peak power density 와 DNB 발생 여부를 확인한다.

3. 울진 1,2 호기에 RAOC 적용

울진 1,2 호기는 Siemens사와 한국원자력연구소가 공동 설계한 JDFA(Joint Design Fuel Assembly)연료로 부터 한국원전연료(주)가 설계하는 KNFC 17x17 개량연료로 천이 되는 혼합 노심이다. 한국원전연료(주)와 Westinghouse는 공동으로 Westinghouse 방법론[3]에 따라 Reload Transition Safety Report (RTSR)를 작성하였다.[4] RTSR 시 사용된 방법과 모델은 Westinghouse PHEONIX-P/ANC 방법론[5]에 따라 혼합 노심과 평형 노심에서 각각 Fuel dependent 한 Safety analysis와 관련 평가를 수행하였다.

RAOC ΔI band 계산은 RTSR의 한 부분으로 Westinghouse PHEONIX-P/ANC 방법론에 따라 2.3절에 기술된 절차에 의해 계산되었다. 계산된 ΔI band는 그림 2와 같이 기존의 ΔI band보다는 넓은 Band를 보여 주고 있다. 특히 50% 미만 출력에서는 ΔI band 크기가 Design Limit에 영향을 주지 않으므로 Band 크기에 제한을 두지 않고 있다.[4]

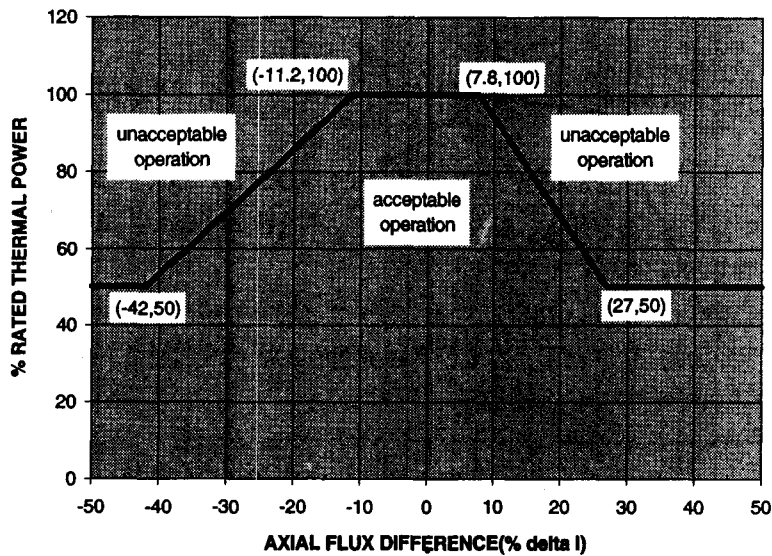


그림 2. 새로운 ΔI Band

4. 결론

RAOC 방법은 기존의 CAOC 방법의 Design Limit에 변화를 주지 않으면서 ΔI band 확장을 통하여 운전의 유연성을 증가시키는 것이다. 울진 1,2 호기 발전소는 RAOC 적용으로 기존의 Variable ΔI band를 충분히 Bounding 할뿐 아니라 Design Limit 변경 없이 운전의 유연성 향상을 기하게 되었다. 즉 넓은 Band 때문 다음과 같은 운전상의 이점을 제공할 것이다:

1. 기존의 운전전략보다는 Boron System 부하를 줄일 수 있다.
2. 발전소 정지 후 운전 제한치를 만족시키면서 신속히 출력을 올릴 수 있다.

3. 기존의 운전제어전략에서 빈번히 요구되는 제어봉 움직임을 줄여 운전원의 부담을 줄여 준다.

또한 CAOC 운전전략을 적용하고 있는 기존의 Westinghouse 형 국내 PWR 원전에서도 RAOC 방법론을 적용하여 위와 같은 운전상의 유연성 향상을 기할 수 있다는 가능성을 제시하고 있다

참고문헌

1. 울진 1,2 호기 최종안전성보고서, Chapter 16
2. Miller, R.W, et al., "Relaxation of Constant Axial Offset Control and F_Q Surveillance Technical Specification," WCAP-10216-P-A(Proprietary), August 1982.
3. Davidson, S.L., et al., "Westinghouse Reload Safety Evaluation Methodology," WCAP-9272-P-A(Proprietary) and WCAP-9273-A(Non-Proprietary), July 1985.
4. "RTSR for Ulchin Units 1 and 2," Westinghouse/KNFC, May 1995
5. Nguyen, T.Q., et al., "Qualification of the PHOENIX-P/ANC Nuclear Design System for Pressurized Water Reactor Cores," WCAP-11596-P-A, June 1988.