



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 2월  
석사학위 논문

# OPR1000 발전소의 축방향출력편차 비정상에 대한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 강 현

# OPR1000 발전소의 축방향출력편차 비정상에 대한 연구

Analysis of the Axial Offset Anomaly of OPR1000

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김강현

# OPR1000 발전소의 축방향출력편차 비정상에 대한 연구

지도교수 나 만 균

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

김 강 현

## 김강현의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 종 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

2020년 11월

조선대학교 대학원

## 목차

표 목차 .....	iii
그림 목차 .....	iv
ABSTRACT .....	vi
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 AOA 개요 및 사례 .....	3
제 1 절 AOA 개요 .....	3
1. AOA 정의 .....	3
2. AOA 발생원인 .....	5
3. AOA 운전 영향 .....	8
4. AOA 방지 방안 .....	8
제 2 절 AOA 사례 .....	8
제 3 장 OPR1000 N-1주기 AOA 위험도 평가 .....	13
제 1 절 위험도 분석 방법론 .....	13
1. 분석 방법론 .....	13
2. 위험도 분석 과정 .....	15
제 2 절 AOA 위험도 평가 .....	16
1. 이전 주기(N-4, N-3, N-2) 벤치마킹 .....	16
2. N-1주기 위험도 평가 .....	16
제 3 절 위험도 평가 결과 분석 .....	19
제 4 장 OPR1000 N주기 AOA 위험도 평가 .....	21
제 1 절 이전 주기 데이터 분석 .....	21
제 2 절 AOA 위험도 평가 .....	21
제 3 절 위험도 평가 결과 분석 .....	22

제 5 장 결론 ..... 24

참고문헌 ..... 25

## 표 목차

표 1. 캘러웨이(Callaway) 발전소 8주기, 9주기, 10주기의 운전 변수 .....	9
표 2. 다양한 노심 크기에 따른 노심 붕소질량 제한값 .....	13
표 3. OPR1000 발전소 N-1주기 AOA 위험도 평가 결과(Case 1) .....	17
표 4. OPR1000 발전소 N-1주기 AOA 위험도 평가 결과(Case 2) .....	18
표 5. OPR1000 발전소 N-1주기 AOA 위험도 평가 결과(Case 3) .....	19
표 6. OPR1000 발전소 N주기 AOA 위험도 평가 결과(Case 1) .....	22

## 그림 목차

그림 1. 노심 축방향출력편차의 개념 .....	3
그림 2. 웨스팅하우스(WH)형 발전소의 축방향출력편차 예시 .....	4
그림 3. 컴버스천 엔지니어링(CE)형 발전소의 축방향출력편차 예시 .....	5
그림 4. 축방향출력편차 비정상(AOA)의 원인 요소 .....	6
그림 5. 핵연료봉 상부에 침적되는 크러드와 붕소 .....	7
그림 6. 캘러웨이(Callaway) 발전소 9주기 크러드 시편의 SEM 분석 결과 .....	10
그림 7. 캘러웨이(Callaway) 발전소 9주기 출력감발 운전 에 따른 리튬의 거동 .....	11
그림 8. 캘러웨이(Callaway) 발전소 9주기 출력감발 및 pH 감소 운전 추이 .....	12
그림 9. 연료 집합체 노심에서의 예측된 붕소질량과 축방향출력편차 간 관계 .....	14
그림 10. 캘러웨이(Callaway) 발전소 13주기 BOB코드 노심 붕소질량 예측 결과 ...	15

# ABSTRACT

## Analysis of the Axial Offset Anomaly of OPR1000

Kang Hyun Kim

Advisor : Prof. Man Gyun Na, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Much research has been conducted around the world since the first axial offset anomaly(AOA) phenomenon occurred in 1988. In June 2015, there was an axial offset anomaly in Korea. It caused a significant difference between the design axial shape index(ASI) and actual measured ASI. In the case of OPR1000, the difference between the design ASI value and the measured ASI value tends to increase little by little. Therefore, there is a sufficient risk that AOA may occur. So, it is necessary to evaluate and analyze the AOA risk of OPR1000 before the AOA occurs, and reduce the AOA risk. It is important to find the optimal zinc injection time to lower the AOA risk since some OPR1000 plants have plans to perform zinc injection during operation. Therefore, in this thesis, AOA risk assessment is performed to find the optimal zinc injection time to reduce the AOA risk in OPR1000 which is performing zinc injection. The optimum zinc injection time will be analyzed through AOA risk assessment in  $(N-1)^{th}$  and  $N^{th}$  fuel cycles.

As a result of  $N^{th}$  fuel cycle AOA risk assessment of OPR1000, it was evaluated that the maximum value of core boron mass did not exceed the limit value of AOA recommended by EPRI even after zinc injection after 50 EFPD at

the beginning of the cycle, and it was found that the possibility of AOA was low. The results of AOA risk assessment showed that zinc injection was possible after 50 EFPD. Based on the zinc injection experiences of other plants, the best time of second zinc injection was conservatively evaluated as 100 EFPD after OPR1000  $N^{th}$  fuel cycle startup.

Some OPR1000 plants plan to perform zinc injection during operation, and finding the optimal zinc injection time in the plants is an important problem. In this thesis, AOA risk assessment of  $(N-1)^{th}$  and  $N^{th}$  fuel cycles in OPR1000 was conducted to investigate the optimal zinc injection time to reduce AOA risk. Zinc injection in  $N^{th}$  fuel cycle was found to be possible at the beginning of the cycle (50EFPD), unlike 200 EFPD in  $(N-1)^{th}$  fuel cycle. This is the optimal zinc injection time for the economy and safety of the reactor and can be effectively used for zinc injection in OPR1000. This study showed that the second zinc injection can be performed at the beginning of the fuel cycle, which is a meaningful result. Since the deviation between the design ASI and the measured ASI is continuously increasing in OPR1000, careful monitoring is needed and zinc injection is required to be performed in accordance with the optimal time found by the AOA risk assessment.

## 제 1 장 서 론

1988년 가압경수로(PWR, Pressurized Watered Reactor)에 최초로 축방향 출력편차 비정상(AOA, Axial Offset Anomaly)이 발생한 이후 국내외적으로 많은 연구가 진행되어왔다. 2015년 6월 국내에서도 심각한 축방향 출력편차 비정상(AOA)이 발생했으며, 이에 대응하여 원자로 출력운전 감발 및 수화학 운전 등을 수행하여 비정상 사건에 대응하였다.

AOA(Axial Offset Anomaly)는 축방향 출력편차(Axial Offset 또는 Axial Shape Index)의 설계값과 측정값 간 차이가 3% 이상 발생하는 현상을 말한다. AOA 현상은 핵연료 피복관 상부 표면에 침적되는 크러드(CRUD)에 의해 유발된다. 크러드에 붕소(B)가 결합하여 중성자를 과잉 흡수하면 핵연료의 반응 속도가 저하되어 출력이 감소하는데, 그로 인해 핵연료의 축방향 출력편차가 커져 AOA(Axial Offset Anomaly) 현상이 발생하는 것이다. AOA가 과도하게 발생할 경우 충분한 정지여유도를 갖기 위해 출력감발 운전이 필요한데 이는 경제적 손실과 원자로의 건전성 및 신뢰성 저하를 야기한다.

이번 논문의 연구 대상인 OPR-1000 발전소들의 경우, 주기가 다음 주기로 진행될 수록 축방향 출력편차의 설계값과 측정값 간 차이가 조금씩 증가하는 경향성을 띠며 AOA가 발생할 위험성을 가지고 있다. 또한 OPR-1000 발전소들은 향후 아연주입을 수행할 계획이다. 그러므로 OPR-1000 발전소에서 AOA 위험도를 증가시키는 아연주입을 수행하는 경우, AOA 위험도를 먼저 평가 및 분석하여 AOA 위험도가 낮은 최적의 아연주입 시기를 찾는 것이 매우 중요한 문제이다. 이번 연구에서는 N-1주기와 N주기에 대한 AOA 위험도 평가를 통하여 가장 낮은 최적의 아연주입 시기를 찾을 것이다. 그리고 AOA 위험도 평가를 통해 도출된 최적의 아연주입 시기 결과를 향후 OPR-1000에서 아연주입을 수행할 시 적용할 수 있다.

OPR-1000 발전소에 대한 AOA 위험도를 평가하기 위해 미국 전력연구소(EPRI)에서 만든 BOA<sup>1)</sup> 코드를 사용하였다. 분석 방법은 다음과 같다. AOA 위험도 평가를 위해 이전 주기의 발전소 설계자료, 계통 운전 조건 등을 입력하고 원자로 정지, 증기발생기 교체, 아연주입 및 초음파 세정 등의 운전조건 변경에 따른 붕소 침적량 변화를

---

註 1) 미국 전력연구소(EPRI)에서 개발한 AOA 위험도 평가코드

계산하여 AOA 발생 여부를 평가한다. 이에 필요한 입력 자료는 연소도별 붕소농도, 증기발생기 세관 표면적과 재질, 정지화학처리 시 부식생성물 양, RCS 유량 등이다. BOA 코드 결과에 영향을 끼치는 주요 인자들은 아연 주입, 증기발생기 교체 등 RCS 운전환경의 변화를 유발하는 작업들이다. BOA 코드 수행 시 결과 값으로 노심 붕소질량 최대값, 크러드 두께 최대값, 주기말 니켈/철 비율, 주기말 니켈 질량 등이 도출된다.

BOA 코드 수행 후 노심 내 존재하는 붕소질량의 최대값을 계산하여 AOA 발생 유무를 평가한다. 미국 전력연구소(EPRI) 가이드라인에서는 177다발의 핵연료를 가진 원자로의 경우 AOA 발생의 기준이 되는 제한값을 노심 붕소질량 최대값 0.28 lbm으로 제시하고 있다. 그러므로 BOA 코드 수행 후 결과 파일에서 노심 붕소질량의 최대값이 0.28 lbm을 크게 초과할 경우, 해당 주기에서 AOA 발생 위험성이 높다고 평가할 수 있다.

이번 연구에서는 OPR-1000 발전소에 대한 AOA 위험도 평가를 수행하여 AOA 위험도가 가장 낮은 최적의 아연주입 시기를 찾고자 한다.

## 제 2 장 AOA 개요 및 사례

### 제 1 절 AOA 개요

#### 1. AOA 정의

AOA(Axial Offset Anomaly)란 봉소가 노심 상단부에 침적되어 축방향 출력편차(Axial Offset 또는 Axial Shape Index)의 설계값과 측정값이 3% 이상 차이가 발생하는 현상을 말한다. 이때 노심하부로 출력이 편중되며 일정기간 경과 후 상부 출력이 증가한다. 2002년 미국 웨스팅하우스社에서 CRUD 침적에 의한 AOA를 CIPS(Crud Induced Power Shift)로 규명하였으나 현재에는 AOA를 공식 용어로 사용하고 있다.

여기서 축방향출력편차(Axial Offset 또는 Axial Shape Index)란 그림 1과 같이 전체 출력에 대한 노심 상부출력과 하부출력의 차이를 나타내는 값이다.

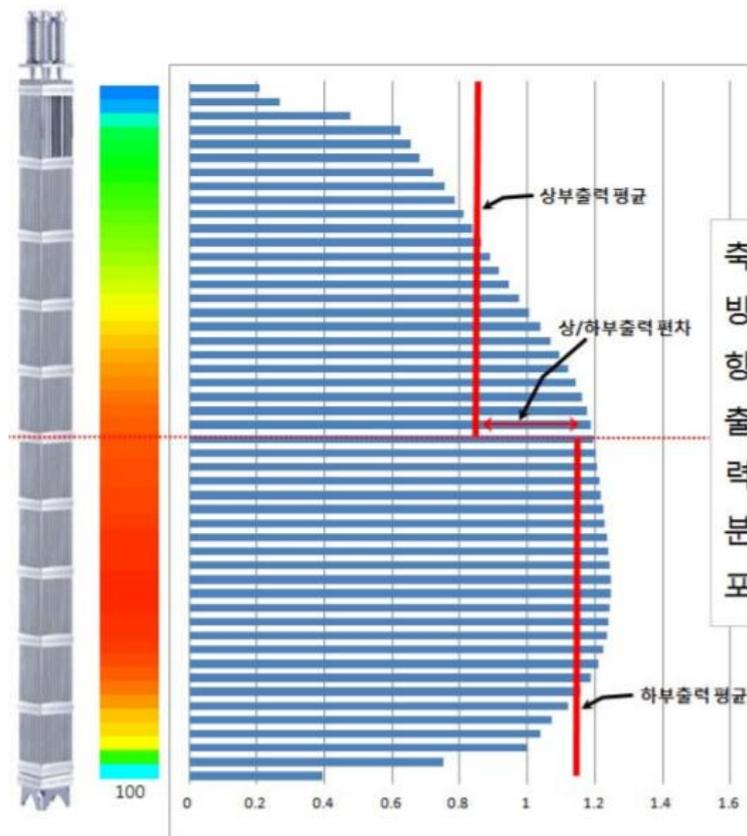


그림 1. 노심 축방향출력편차의 개념

축방향출력편차는 원자로 노형이 웨스팅하우스(WH)형인지 CE형인지에 따라 다른 용어를 통해 정의하고 있다.

$$(1) \text{ AO(Axial Offset, WH형)} = \frac{P_T - P_B}{P_T + P_B} \times 100 \quad 2)$$

$$(2) \text{ ASI(Axial Shape Index, CE형)} = \frac{P_B - P_T}{P_T + P_B}$$

노심 내에서 발생하는 AOA 현상에 대한 그래프는 원자로 노형이 웨스팅하우스(WH)형인지 CE형인지에 따라서 양상이 다르다. 그 이유는 축방향 출력편차의 정의가 웨스팅하우스(WH)형은 상부출력에서 하부출력을 뺀 값을 전체 출력으로 나눈 것이지만 CE형은 하부출력에서 상부출력을 뺀 값을 전체 출력으로 나눈 것이기 때문이다. 그림 2 및 그림 3을 보면 알 수 있듯이 AOA 발생 시 주기 중반 웨스팅하우스(WH)형은 측정된 축방향 출력편차가 음의 값을 보이지만 CE형은 양의 값을 보인다.

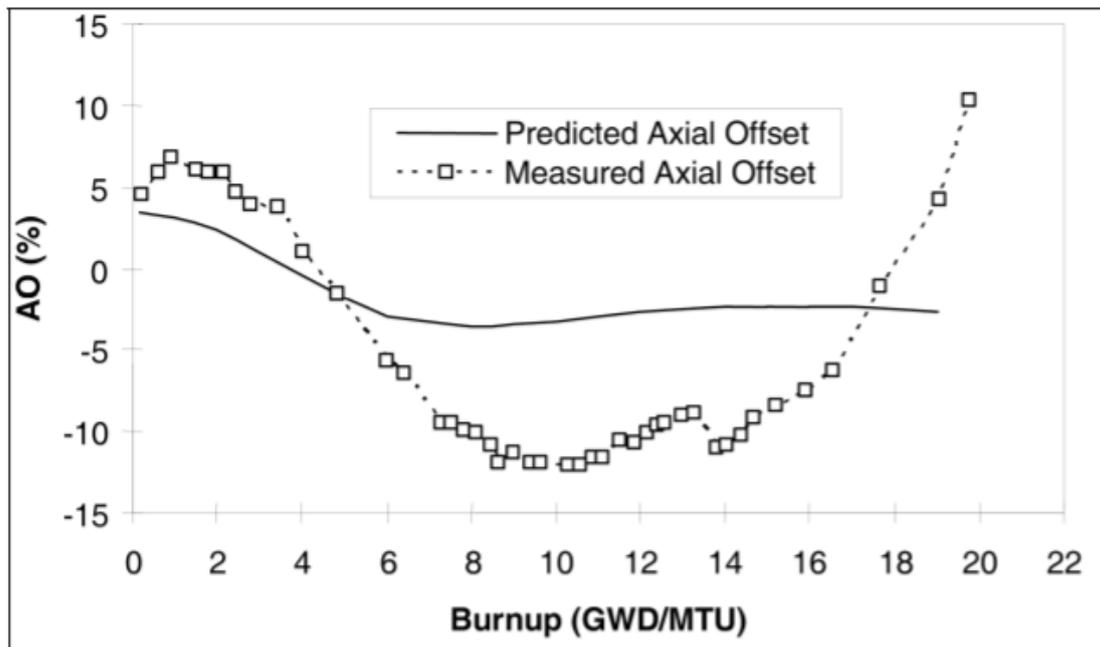


그림 2. 웨스팅하우스(WH)형 발전소의 축방향출력편차 예시

2) 노심 출력을 축방향으로 1/2로 나누어 상부쪽은 상부출력( $P_T$ ), 하부쪽은 하부출력( $P_B$ )

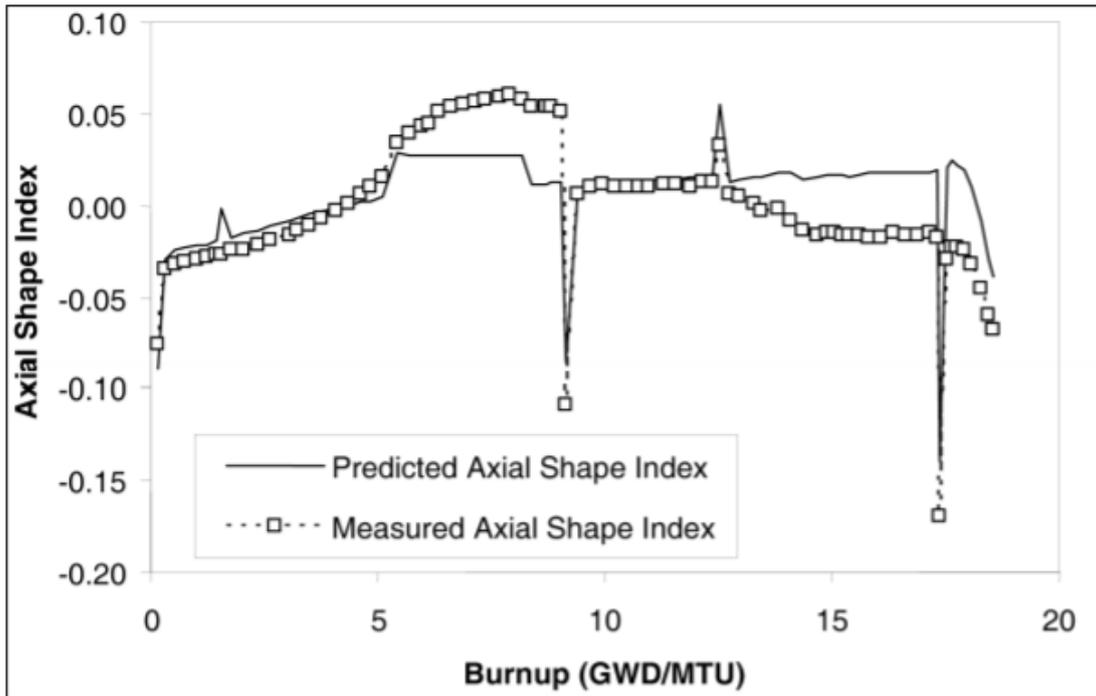


그림 3. 컴버스천 엔지니어링(CE)형 발전소의 축방향출력편차 예시

이번 연구 대상은 웨스팅하우스(WH)형이 아닌 CE형 원자로인 OPR-1000에 대한 것이므로 축방향 출력편차를 언급할 때 AO(Axial Offset)가 아닌 ASI(Axial Shape Index)라는 용어를 사용할 것이다.

## 2. AOA 발생원인

AOA의 발생 메커니즘은 그림 4와 같이 세 가지 현상이 동시에 결합되었을 때 발생한다.

- 과냉핵비등(Sub-cooled Nucleate Boiling, SNB)으로 연료봉 표면 증기 발생
- 냉각재 내 부식생성물(Coolant corrosion products) 생성
- 냉각재 내 반응도제어물질 붕소(Soluble boron in coolant) 침적

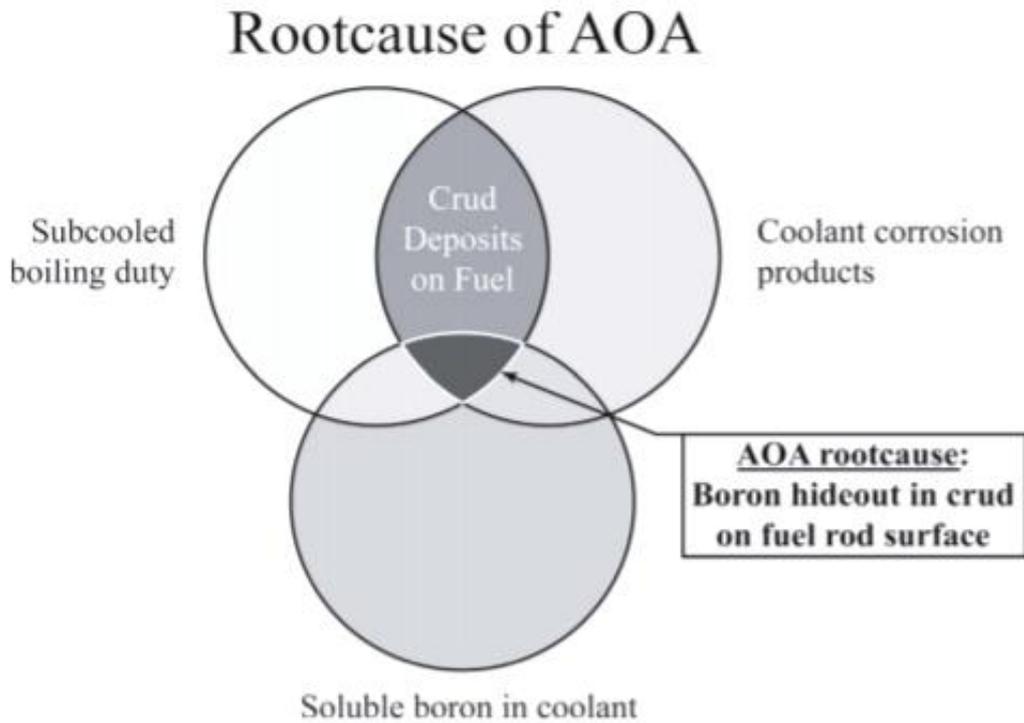


그림 4. 축방향출력편차 비정상(AOA)의 원인 요소

세 가지 현상이 동시에 발생했을 때 연료봉 상부 표면에 크러드와 붕소화합물이 침적된다. 상부 표면에 침적된 크러드와 붕소화합물에 의해 중성자가 과도하게 흡수되고 핵연료의 반응속도가 떨어져 침적부위 출력이 감소하는 것이다.

첫 번째 현상인 과냉핵비등(Sub-cooled Nucleate Boiling, SNB)이란 냉각재 평균 온도는 비등점 이하인데 반해 연료 표면온도는 비등점보다 높은 것으로 인해 연료 표면에서 비등이 발생하여 생성된 수증기포가 즉시 소멸하거나 연료 표면에서 이탈 후 소멸하는 현상이다. 핵연료부담지수(Fuel Duty), 선출력밀도, 질량비등률(Mass Evaporation Rate)이 높은 핵연료에서 많이 발생한다. 노심 상단부로 갈수록 냉각재의 엔탈피가 상승하기 때문에 과냉핵비등 또한 증가하게 된다.

두 번째 현상인 냉각재 내 부식생성물은 다음과 같이 생성된다. 니켈, 철 등은 고온에서 용해도가 감소하면 석출되는 특성을 가지는데 증기발생기 세관이나 1차 계통 배관에서 이러한 물질들이 석출되면서 냉각재 내에 부식생성물이 생성된다. 특히 연료 피복재의 과냉핵비등(SNB) 발생이 높은 부위에  $Ni$ ,  $NiO$ ,  $NiFe_2O_4$  형태로 생기는 침

적물을 크러드라고 하는데, 이때 형성된 크러드는 연료와 냉각재 간 열전달을 방해함으로써 비등이 잘 일어나게 되고 크러드의 침적 또한 급격히 증가시킨다. 부식생성물은 증기발생기 교체가 이루어지거나 아연주입을 수행한 이후에 2 ~ 3주기 동안 증가 추세를 보인다. 이것은 증기발생기 교체 후에 산화막이 형성되지 않은 기간동안 세관 표면의 부식률이 높고, 아연이 증기발생기 세관이나 배관의 기존 산화막을 형성했던 니켈, 철을 치환하여 산화막을 형성한 후 니켈, 철이 냉각재로 녹아나오기 때문이다. 증기발생기는 부식생성물 형성의 가장 중요한 요소인데 그 이유는 증기발생기 세관 표면적이 1차계통 면적의 약 65% 정도의 크기이기 때문이다.

세 번째 현상인 냉각재 내 붕소는 그림 5처럼 노심 상단부에 주로 침적되는 크러드와 결합한다. 붕소는 중성자흡수단면적이 매우 크기 때문에 노심 상단부는 출력이 감소되고 하단부는 출력이 증가되는 현상을 유발한다.

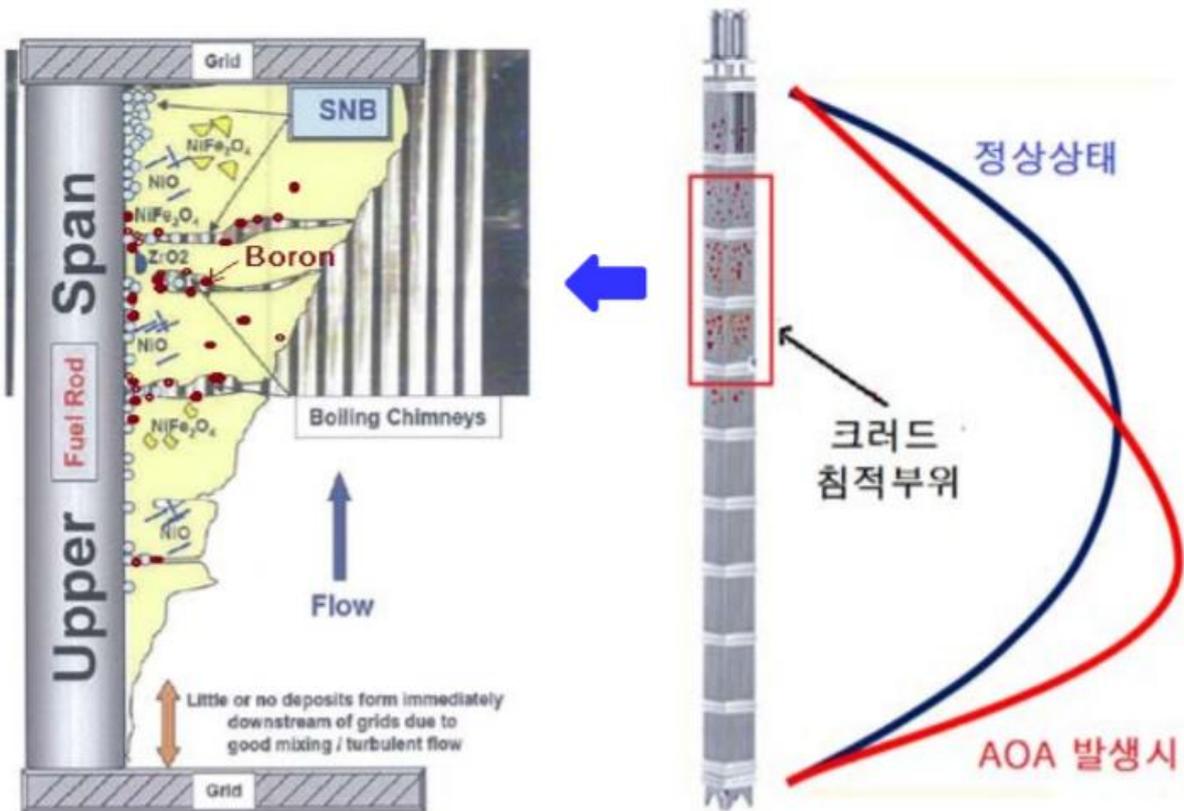


그림 5. 핵연료봉 상부에 침적되는 크러드와 붕소

### 3. AOA 운전 영향

AOA가 발생하는 경우 노심의 운전에 여러 가지 영향을 끼친다. 축방향 출력이 하부 쪽으로 치우쳐서 노심의 하부에서 연소가 증가하는데 이로 인해 다음 주기 초 출력이 상부 쪽으로 치우치게 된다. 그리고 정지여유도 확보와 축방향 출력편차를 줄이기 위해 출력 감발이 필요하며 출력 운전 중 AOA가 발생할 경우 출력 감발을 해야 한다. 또한 노심 운전 중 운전여유도가 감소하며 방사선작업자의 경우 부식생성물이 방출됨에 따라 피폭선량이 증가한다. AOA 발생 시 열전도율이 낮아지면서 고온인 연료봉 표면의 부식 정도가 심화되고 이로 인해 산화막 두께가 증가한다. 이외에도 출력편차 발생에 의해 다음 주기 원자로특성시험의 초기조건이 불만족할 가능성이 커진다. 이와 같은 여러 문제점을 갖고 있기 때문에 원자로 운전 시에 발생할 수 있는 AOA를 미연에 방지하는 것이 매우 중요하다고 볼 수 있다.

### 4. AOA 방지 방안

AOA를 방지하기 위해서는 AOA 발생의 요인이 되는 현상들을 감소시켜 AOA 위험도를 저감시킬 수 있다. 과냉핵비등 현상을 감소시키기 위해서는 노심설계 시 비등 최소화 설계를 하여 AOA 위험도를 낮출 수 있고, RCS 내 크러드를 감소시키기 위해서는 원자로 정지 시 연료 초음파 세정, 정지화학처리 개선방안 시행 등을 통해 AOA 위험도를 낮출 수 있고, 원자로 운전 시 정화유량 최대운전, 필터 교체, 혼상탈염기 사용 등을 통해 AOA 위험도를 낮출 수 있다.

## 제 2 절 AOA 사례

해외에서 가장 심각했던 AOA 발생 사례인 미국 Callaway 발전소 9주기에 대해서 예를 들고자 한다. 미국 Callaway 발전소 9주기(1996년 11월 ~ 1998년 4월) 운전 중 최악의 AOA가 발생하여 축방향출력편차의 설계값과 측정값 간 최대 -14%의 차이가 발생하였다. Callaway 발전소 9주기 후반에는 심각한 AOA로 인해 발전소 출력을 70 %까지 감발 운전하였다. 표 1은 AOA가 발생한 Callaway 9주기와 선행주기, 후행주기의 노심 및 수화학 변수들에 대한 비교표이다. 이 표를 통하여 그 당시 주기 길이, 원자로 냉각재 온도, 최대 붕소농도, 최대 리튬농도, pH 등을 알 수 있다.

표 1. 캘러웨이(Callaway) 발전소 8주기, 9주기, 10주기의 운전 변수

	Cycle 8	Cycle 9	Cycle 10
<b>Core Parameters</b>			
Cycle Length EFPD, d	495	436	495
Cycle Length, d	530	508	517
Tavg, °C	308.9	308.5	308.5/306.4
Thot, °C	325.5	325.5	325.5/323.3
Tcold, °C	292.3	291.8	291.8
Number of IFBAs	6,272	7,712	6,880
Number of WABAs	0	0	544
AOA, %	-8	-14	-12
<b>Chemistry</b>			
Max Boron, ppm	1,400	1,380	1,230
Max Lithium, ppm	2.2	2.6	2.9
$pH_{Tavg}$	6.95-7.4	7.0-7.1	7.1-6.9-7.2
$pH@300^{\circ}C$	6.85-7.3	6.9-7.0	7.0-6.8-7.1
Average $^{58}Co, \mu Ci/g$	0.0038	0.016	0.021
Refuelling $^{58}Co$ Return, Ci	1,098	1,104	1,947
Refuelling Ni Return, kg	4.2	3.3	4.1

Callaway 원자력 발전소에서 AOA가 발생된 이후 미국 전력연구소를 중심으로 원자력발전소 공급자인 웨스팅하우스와 원자력발전소 운영회사들이 문제해결을 위한 연구를 수행하였다. 연구결과에서 핵연료봉의 축방향 출력분포를 왜곡시키는 축방향출력편차 비정상은 과냉핵비등이 발생하는 노심 상부쪽에 크러드가 집중적으로 침전되어 다공성 매질을 형성하고 붕소의 잠복현상이 여기에 나타나 고농도의 붕소에 의해  $BLSUP10(n, \alpha)^7Li$  반응이 일어나 중성자속이 저하하여 발생한다고 보았다. 즉 AOA 현상이 발생하기 위해서는 과냉핵비등이 발생하고, 냉각재 내 충분한 양의 크러드 및 잠복 가능한 충분한 양의 붕소가 존재해야 함을 알 수 있다.

그림 6은 Callaway 발전소 9주기의 크러드 시편에 대한 주사전자현미경(SEM) 분석 결과이다. W.A. Byers 등의 연구진은 Callaway 발전소에서 채취한 크러드 단면을 관찰 및 분석하여 크러드 층의 조성을 세밀하게 검토하였다. AOA가 발생한 노심에서 크러드는 세 개의 층으로 구분되며 피복관 위에서부터 순서대로  $ZrO_2$ ,  $Ni_2FeBO_5$ ,

$ZrO_2$ ,  $NiFe_2O_4$ ,  $NiO$  층으로 구조를 가지고 있음을 확인했다. 그리고 크러드를 구성하고 있는 원소의 비율은 니켈이 철에 비해 더 많은 부분을 차지한다는 것을 확인했다. AOA 현상에 대한 연구가 진행되면서 이러한 구조를 가진 크러드의 기공에서 붕소의 거동이 AOA 현상과 직접적인 연관성을 갖는다는 것이 연구를 통해 차츰 알려지게 되었다.

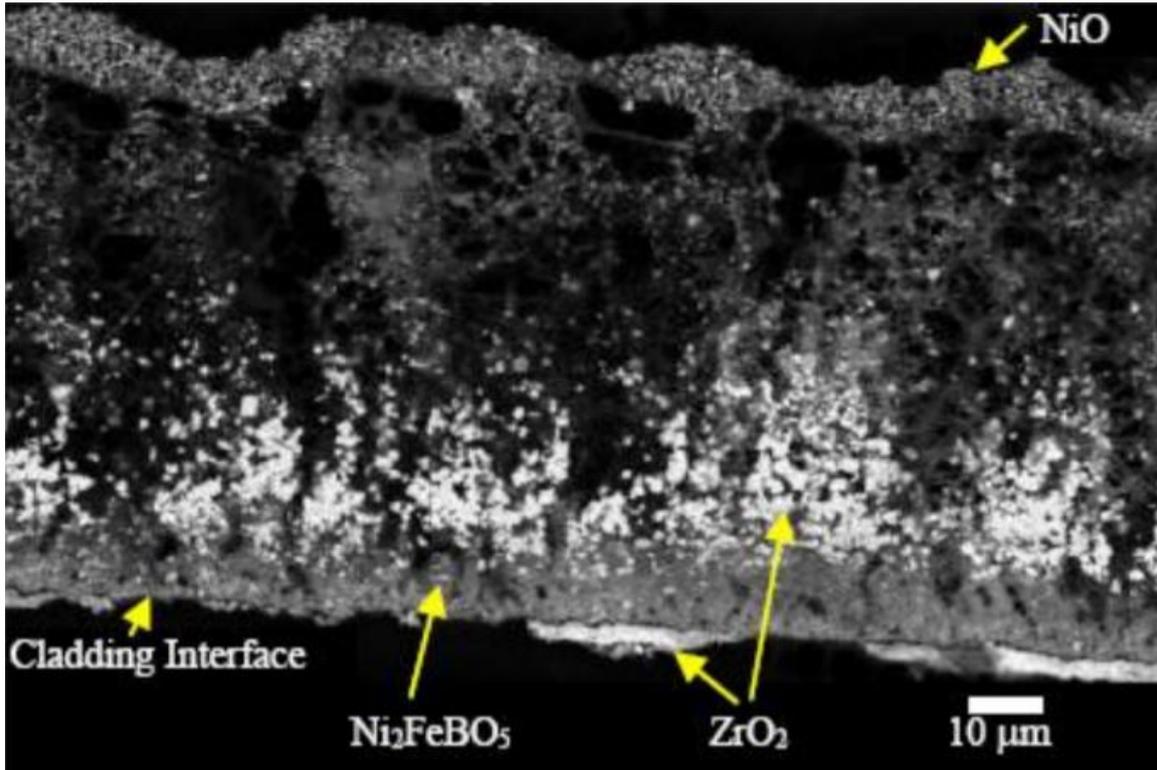


그림 6. 캘러웨이(Callaway) 발전소 9주기 크러드 시편의 SEM 분석 결과

원자로에서 출력감발 운전을 하게 되면 붕소와 리튬이 방출되고 그로 인해 원자로냉각재의 붕소와 리튬 농도는 증가한다. 심각한 AOA 현상이 발생한 Callaway 발전소 9주기의 출력감발 운전 시에도 출력감발 운전 중 원자로냉각재로 리튬이 방출되는 것이 발견되었다. 그림 7은 Callaway 발전소 9주기 출력감발운전에 따른 리튬의 거동을 보여준다.

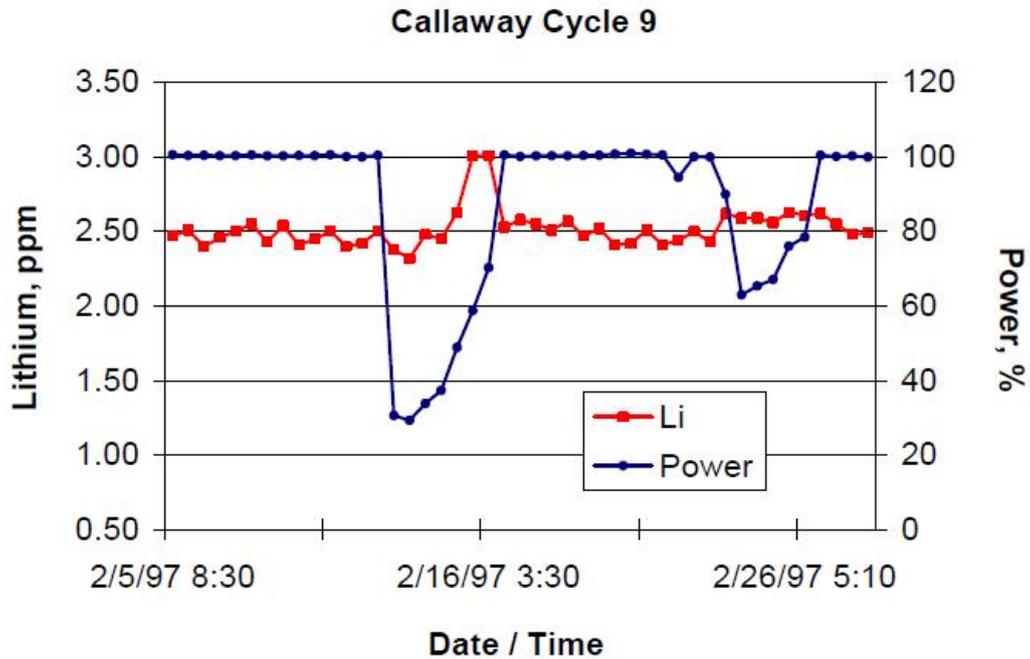


그림 7. 캘러웨이(Callaway) 발전소 9주기 출력감발 운전에 따른 리튬의 거동

출력감발 운전 중 리튬이 방출되는 양은 AOA의 심각성과 출력의 변화에 의존하여 변화하였다. 출력감발 운전 중 발생하는 리튬이 방출되는 양은 AOA의 심각성을 알려주는 지표로 쓸 수 있다.

미국 Callaway 발전소 9주기에서는 안전 여유도를 회복하기 위해 주기 후반에 출력감발 운전을 수행하였고, pH 감소운전(7.1 → 6.9) 또한 수행하였다. 그림 8은 당시 Callaway 발전소의 출력감발운전과 pH 감소운전으로 인해 변화된 축방향 출력편차를 보여준다.

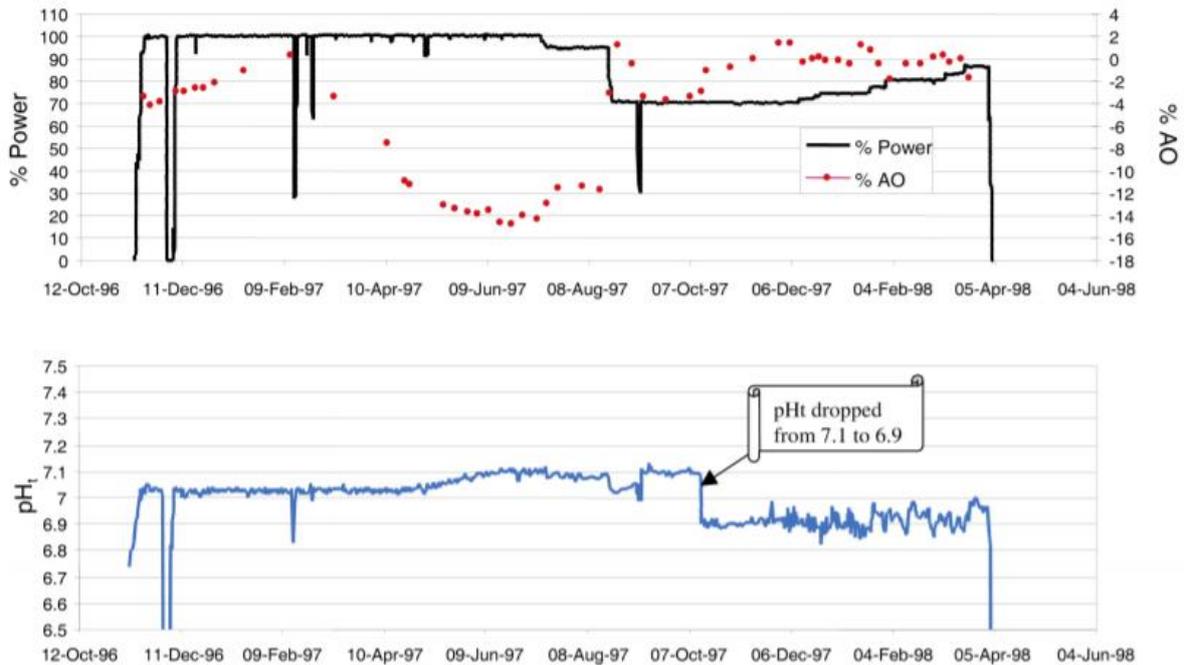


그림 8. 캘러웨이(Callaway) 발전소 9주기 출력 감발 및 pH 감소 운전 추이

그림 8에서 보듯이 Callaway 발전소는 주기 후반인 약 1997년 8월 중 출력을 70%로 감발하였고, 그 결과 축방향 출력편차의 절대값이 이전보다 작은 값으로 회복되었다. 그리고 출력감발 이후 pH 감소 운전 또한 수행하여 축방향 출력편차 값이 더욱 작은 값으로 회복되었다는 것을 볼 수 있다. 이처럼 AOA 완화 대책인 출력감발 운전 또는 pH 감소운전을 통해 축방향 출력편차를 보다 작은 값으로 회복시킬 수 있다. Callaway 발전소 9주기는 AOA 완화대책인 출력감발 운전과 pH 감소운전을 수행하여 축방향출력편차 값을 회복한 후 주기 운전을 종료하였다.

## 제 3 장 OPR1000 N-1주기 AOA 위험도 평가

### 제 1 절 위험도 분석 방법론

#### 1. 분석 방법론

AOA 위험도를 분석하기 위해 사용하는 코드는 미국 전력연구소(EPRI)에서 개발한 BOA(Boron-Induced Offset Anomaly) 코드이다. BOA 코드는 AOA 위험도를 평가하기 위해 개발되었다. 분석 방법은 다음과 같다. AOA 위험도 평가를 위해서 이전 주기의 발전소 설계자료 및 계통 운전 조건 등을 입력하고 원자로 정지, 증기발생기 교체, 아연주입 및 초음파 세정 등의 운전 조건 변경에 따른 붕소침적량의 변화를 계산하여 AOA 발생 여부를 평가한다.

AOA 위험도 평가 코드인 BOA 코드에 필요한 입력 자료는 연소도별 붕소농도, 증기발생기 세관 표면적과 재질, 정지화학처리 시 부식생성물의 양, 원자로냉각재 유량 등이다. 이때 BOA 코드의 결과에 영향을 미치는 주요 인자들은 아연주입 여부, 증기발생기 교체 여부 등 원자로냉각재 운전환경의 변화를 유발하는 작업들이다. BOA 코드를 수행하면 결과값으로 최대 노심 붕소질량, 최대 크러드 두께, 주기말 니켈/철 비율, 주기말 니켈질량 등이 계산된다. 이들 중 노심 내 존재하는 붕소 질량의 최대값을 계산하여 AOA의 발생 유무를 평가하는 것이다.

측방향 출력편차의 변화는 일차적으로 노심 내 축적된 붕소 질량에 기인하며, 노심 내 붕소의 분포는 이차적인 역할을 한다. 미국 전력연구소(EPRI)에서는 AOA 위험도를 분석하기 위한 목적으로 표 2와 같이 측방향 출력편차가 2 %보다 큰 값을 보이는 노심 조건에 대한 붕소질량 제한값을 설정하였다.

표 2. 다양한 노심 크기에 따른 노심 붕소질량 제한값

Core Size (# of Assemblies)	121	157	177	193	217	241
Threshold for AOA (lbm)	0.19	0.24	0.28	0.30	0.34	0.37
Moderate AOA (lbm)	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
Severe AOA (lbm)	1.3	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5

AOA 위험도는 노심에 침적된 붕소질량의 최대값이 얼마인지에 기반하여 평가할 수 있다. 그림 9에서처럼 BOA 코드의 AOA 노심 모델링에서 예측된 붕소 질량은 노심의 축방향 출력편차를 보여주는 지표이다. 미국 전력연구소(EPRI) 가이드라인에 따르면 193개의 집합체를 가진 노심에서 1 lbm의 노심 내 붕소질량 최대값은 약 -5 %의 축방향 출력편차에 상응하는 값으로 볼 수 있고, 2 lbm의 노심 내 붕소질량 최대값은 약 -10 %의 축방향 출력편차에 상응하는 값으로 볼 수 있다. 그리고 표 2에서의 Moderate AOA는 -5 %의 AOA를 의미하고, Severe AOA는 -10 %의 AOA를 의미한다. 193개의 연료집합체를 가진 노심보다 더 작은 노심은 노심의 크기에 비례하여 -5 %와 -10 %의 축방향 출력편차를 나타내는 붕소질량이 더 작을 것이다. OPR-1000의 경우 177개의 연료 집합체를 가진 노심이므로 표 2에서 보듯이 0.28 lbm을 AOA 위험도를 평가하는 제한값으로 볼 수 있다. 이 제한값은 이번 연구에서 OPR-1000의 AOA 위험도를 평가하는 기준이며 매우 중요한 값으로 사용될 것이다.

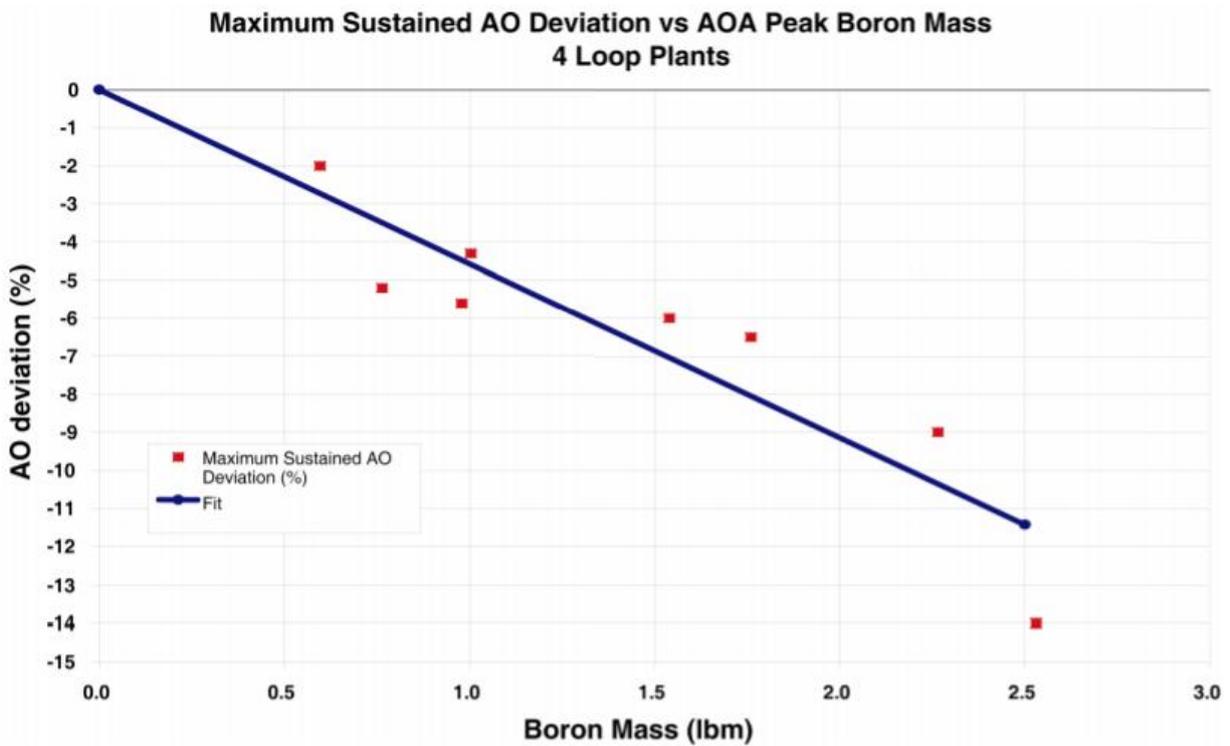


그림 9. 연료 집합체 노심에서의 예측된 붕소질량과 축방향출력편차 간 관계

그림 10은 웨스팅하우스(WH)에서 Callaway 발전소 13주기에 대하여 AOA 위험도 평가를 수행한 결과이다. AOA 위험도를 수행하기 위해 사용된 코드는 EPRI의 BOA 코드 이전에 사용되었던 웨스팅하우스(WH)의 BOB 코드이다. AOA 위험도 평가 결과 Severe AOA(-10%)와 Moderate AOA(-5%)의 기준이 되는 노심 내 붕소 질량보다 낮은 결과값을 보여주고 있다. 그리고 그래프에서 아연주입을 수행했을 때(Cy13 5ppb Full Cycle, Cy13 10ppb Full Cycle) 붕소질량이 수행하지 않은 경우(Cy13 Nominal)보다 크게 나오는 것과 아연의 농도(ppb)가 높을수록 붕소질량이 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 이는 아연주입을 수행했을 때 AOA 발생 위험도가 커지고, 더 높은 농도의 아연을 주입할수록 AOA 발생 위험도가 커진다는 것을 의미한다.

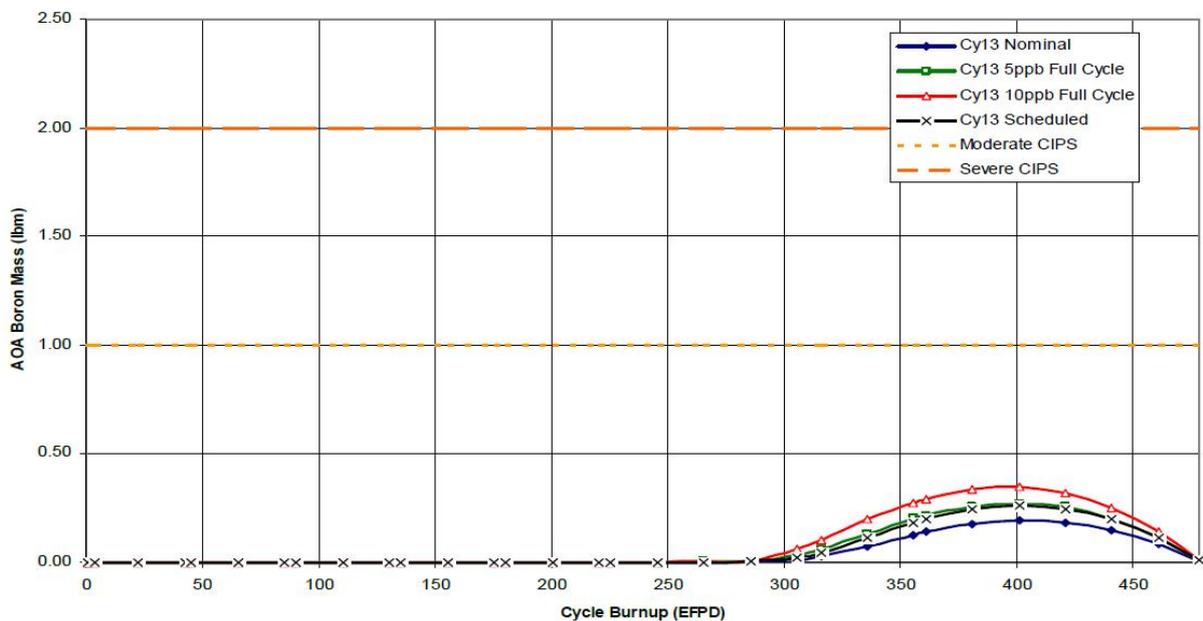


그림 10. 캘러웨이(Callaway) 발전소 13주기 BOB<sup>3)</sup>코드 노심 붕소질량 예측 결과

## 2. 위험도 분석 과정

AOA 위험도 분석을 위한 BOA 코드 수행 시 아연주입과 사용후연료 초음파 세정을 주요 가정인자로 사용할 수 있다. 5 ppb 농도의 아연주입 시작 시기를 각 연소도별로 구분하여 분석이 가능하다. 아연주입 기간을 구간별로 나누어 50 EFPD, 100 EFPD,

3) EPRI의 BOA코드 이전 웨스팅하우스(WH)에서 개발한 AOA 위험도 평가 코드

150 EFPD, 200 EFPD, 300 EFPD, 450 EFPD 도달 시부터 주기 종료 시까지 수행했다고 가정하여 입력값으로 설정할 수 있다. OPR-1000에서 5 ppb 농도의 아연을 연속 주입하는 방법으로 수행하고 있다고 가정하여 BOA 코드 수행 시 5 ppb의 값으로 아연 농도를 설정한다. 사용후연료 초음파 세정 또한 입력값으로 설정할 수 있다. 보통 초음파 세정의 효율은 EPRI에서 권고하는 값인 40%를 가정하여 입력값으로 설정한 후 코드를 수행한다.

출력운전 이력 또한 BOA코드에 반영이 가능한데 원자로 불시정지가 발생했을 때 발생 여부 및 기간을 BOA코드에 입력값으로 설정할 수 있다. 예를 들어, OPR-1000 N-1주기 위험도 평가를 할 시 N-4주기, N-3주기, N-2주기의 출력 운전 이력을 반영하여 코드를 수행할 수 있다. 주요 가정인자인 아연주입과 사용후연료 초음파 세정을 가정하고 이전 주기들의 출력운전 이력들을 반영하여 위험도 평가를 수행할 수 있다. OPR-1000 N-1주기 AOA 위험도 평가 시 결과로 생성되는 값들은 노심 붕소질량 최대값, 크러드 두께 최대값, 주기말 니켈/철 비율, 주기말 원자로냉각재계통 내 니켈 금속 질량 등이며 이 결과값들을 통해 OPR-1000 N-1주기 AOA 위험도를 예측할 수 있는 것이다.

## 제 2 절 AOA 위험도 평가

### 1. 이전 주기(N-4, N-3, N-2) 벤치마킹

OPR-1000 발전소의 N-1주기 위험도 평가를 수행하기에 앞서, 이전 주기들의 데이터를 분석하여 BOA 코드를 수행하고 벤치마킹하였다. 이전 주기에 대하여 BOA 코드를 수행하고 벤치마킹하는 이유는 N-1 주기 평가 결과의 정확도를 높이기 위함이다. 이전 주기들의 BOA 코드 결과를 수행한 결과 노심 내 존재하는 붕소질량의 최대값은 N-4, N-3, N-2주기에 대하여 AOA 발생 기준인 3%에 해당하는 0.28 lbm 이내의 값을 보였다. 그러므로 크러드로 인한 축방향 출력편차 비정상(AOA)은 없는 것으로 분석되었다.

### 2. N-1주기 위험도 평가

OPR-1000 N-1주기 위험도 평가를 하기 위해 미국 전력연구소(EPRI)에서 개발한 BOA 코드 3.1버전을 사용하였다. BOA코드는 여러 케이스 별로 입력값을 다르게 설

정하여 다양하게 분석할 수 있는 장점이 있다. N-1주기 위험도 평가 시 세 가지 Case로 나누어 입력값들을 다르게 설정하여 코드를 수행하였다. 표 3처럼 Case 1에서는 아연주입 미수행, 초음파세정 미수행, 불시정지 없음을 가정하여 BOA코드를 수행하였다. 이전 주기와 동일한 운전조건을 유지할 경우 모든 운전구간에서 노심에 축적된 붕소질량의 최대값이 미국 전력연구소 가이드라인에서 권고한 AOA 발생 제한값(0.28 lbm) 이내로 유지되어 AOA 발생 가능성이 없다는 것을 확인하였다. 단, N-2주기 축방향출력편차 최대값이 AOA 발생 기준인 3%에 가까운 2.62%인 것을 반영한 결과 N-2주기 노심 붕소질량의 최대값은 0.2835 lbm으로 평가되어 EPRI에서 권고한 AOA 발생의 제한값인 0.28 lbm을 초과한 것으로 분석되었다.

표 3. OPR1000 발전소 N-1주기 AOA 위험도 평가 결과(Case 1)

Case 1 : 아연주입 미수행, 초음파세정 미수행, 불시정지 없음 가정					
Result \ Cycle	N-4	N-3	N-2	N-1	EPRI Theshold Limit
Maximum Core Boron Mass (lbm)	0.2858	0.2174	0.2835	0.2164	0.28
Maximum Crud Thickness (mils)	1.6147	1.6782	1.7550	1.7935	3
EOC Ni/Fe Ratio	1.9415	1.9634	1.9298	1.9076	0.5 ~ 2.5
EOC Ni Mass (lbm)	5.6727	5.9789	6.0700	6.0308	N/A

표 4와 같이 Case 2에서는 아연주입 수행, 초음파세정 미수행, 불시정지 1회를 가정하여 코드를 수행하였다. 사용후연료 초음파세정을 수행하지 않고 N-1주기에 5 ppb 농도의 아연을 주입할 경우 전체 주기에 걸쳐 노심 붕소질량의 최대값이 EPRI 권고 제한값인 0.28 lbm을 초과하여 AOA가 발생하는 것으로 평가되었으며, 아연주입 시기가 주기초에 가까워질수록 주요 평가인자 값들이 증가하는 경향을 보였다.

표 4. OPR1000 발전소 N-1주기 AOA 위험도 평가 결과(Case 2)

Case 2 : 아연주입 수행(5ppb), 초음파세정 미수행, 불시정지 1회 가정								
EFPD \ Result	미수행	50	100	150	200	300	450	결과
Maximum Core Boron Mass (lbm)	0.216 4	0.423 4	0.408 6	0.392 2	0.374 4	0.338 3	0.302 5	최대 0.21 lbm 증가
Maximum Crud Thickness (mils)	1.793 5	2.119 8	2.102 9	2.083 7	2.062 8	2.022 2	1.967 7	최대 0.33 mils 증가
EOC Ni/Fe Ratio	1.907 6	2.041 2	2.012 0	2.012 1	1.999 2	1.979 5	1.850 7	-
EOC Ni Mass (lbm)	6.030 8	9.541 7	9.489 5	9.180 6	8.936 1	8.255 4	7.060 5	최대 3.51 lbm 증가

표 5와 같이 Case 3에서는 아연주입 수행, 사용후연료 초음파세정 수행, 불시정지 1회를 가정하여 코드를 수행하였다. 사용후연료 초음파세정 수행(세정 효율 : 40%), 아연주입 수행(농도 : 5 ppb), 불시정지 1회를 가정하였더니 150 EFPD 이전에 아연주입을 할 경우 노심 붕소질량의 최대값이 AOA 발생의 제한값(0.28 lbm)을 초과하였으나, 200 EFPD 이후에 아연주입을 할 경우에는 노심 붕소질량의 최대값이 AOA 발생의 제한값(0.28 lbm)을 초과하지 않는 것으로 평가되었다. 사용후연료 초음파세정 수행을 계획예방정비 기간에 수행한다면 200 EFPD부터 주기말까지의 기간 동안 아연주입이 가능한 것으로 평가되었다.

표 5. OPR1000 발전소 N-1주기 AOA 위험도 평가 결과(Case 3)

Case 3 : 아연주입 수행(5ppb), 초음파세정 수행, 불시정지 1회 가정								
EFPD \ Result	미수행	50	100	150	200	300	450	결과
Maximum Core Boron Mass (lbm)	0.216 4	0.3227	0.306 5	0.290 3	0.273 1	0.241 2	0.209 3	최대 0.11 lbm 증가
Maximum Crud Thickness (mils)	1.793 5	1.9523	1.933 2	1.912 1	1.892 1	1.850 6	1.791 6	최대 0.16 mils 증가
EOC Ni/Fe Ratio	1.907 6	2.0001	1.967 8	1.967 1	1.954 8	1.944 2	1.796 2	-
EOC Ni Mass (lbm)	6.030 8	10.052 1	9.990 9	9.687 8	9.417 1	8.656 2	7.398 5	최대 4.02 lbm 증가

### 제 3 절 위험도 평가 결과 분석

OPR-1000 N-1주기 AOA 위험도 평가를 세 가지 케이스로 나누어 수행하였다. OPR-1000 발전소의 실제 운전 상황과 가장 가까운 케이스는 세 번째 케이스이다. 왜냐하면 원자로 운전을 보수적으로 보았을 때 운전 중 트립이 1회 정도 발생할 수 있고, 초음파 세정과 아연주입을 보통 수행하고 있기 때문이다. 그러므로 OPR-1000의 실제 운전과 가깝게 가정을 하여 보수적으로 평가하였을 때, N-1주기 운전에서는 200 EFPD부터 주기말까지 기간 동안 아연주입이 가능한 것으로 평가되었다. 이 결과는 OPR-1000에서 처음으로 아연주입을 수행할 경우 주기 초반에 시작한다면 AOA 발생 위험도가 높아지므로 주기 중반인 200 EFPD에 조심스럽게 아연주입을 시작할 필요가 있다는 것을 보여준다.

향후 아연주입을 처음으로 수행하는 OPR-1000 발전소가 있다면 주기 초가 아닌

주기 중반에 아연주입을 수행하여 한 주기동안의 AOA 위험도를 가장 낮추는 방향으로 운전할 필요가 있다. 또한 OPR-1000 발전소들의 경우 축방향출력편차(Axial Shape Index) 설계값과 측정값 간의 차이가 지속적으로 증가 추세를 보이고 있다. 그로 인해 축방향출력편차의 설계값과 측정값 간의 차이가 3%를 넘어 AOA가 발생할 위험성을 가지고 있으므로 축방향출력편차 거동에 대한 지속적 감시가 필요하다.

## 제 4 장 OPR-1000 N주기 AOA위험도 평가

### 제 1 절 이전 주기 데이터 분석

OPR-1000 발전소의 N주기 위험도 평가를 수행하기 전에, N-1 주기 평가 시 했던 것과 동일하게 이전 주기들의 데이터를 분석하여 BOA 코드를 이용하고 벤치마킹하였다. 이전 주기들의 BOA 코드를 이용한 결과 노심 내 존재하는 붕소질량의 최대값은 N-3, N-2, N-1주기에 대하여 AOA 발생 기준인 3%에 해당하는 0.28 lbm 이내의 값을 보였다. 그러므로 크러드로 인한 축방향 출력편차 비정상(AOA)은 없는 것으로 분석되었다.

### 제 2 절 AOA 위험도 평가

OPR-1000 N-1주기 AOA 위험도 평가와는 다르게 실제 운전과 유사한 한가지의 케이스로만 설정하여 N주기 AOA 위험도 평가를 수행하였고, 그 결과는 Table 4-1과 같다. N-1주기 AOA 위험도 평가와 마찬가지로 미국 전력연구소(EPRI)에서 개발한 BOA 코드 3.1버전을 사용하였다.

BOA코드 수행 시 OPR-1000의 실제 상황과 유사하게 아연주입 및 초음파세정을 수행한 것으로 가정하고 코드를 수행하였다. 사용후연료 초음파세정을 수행하고(세정 효율 : 40% 가정) 5ppb 농도의 아연을 주입할 경우 주기초 50EFPD 이후 아연주입을 하여도 최대 노심 붕소질량(0.1758 lbm)이 EPRI 권고 제한값(0.28 lbm)을 초과하지 않는 것으로 평가되었다.

OPR-1000 N주기 노심 내 붕소질량은 표 6처럼 아연주입 시기가 주기 초로 갈수록 증가하는 추세이며 최대값은 50EFPD부터 아연을 주입하는 경우에 0.1758 lbm으로 평가되었다.

표 6. OPR1000 발전소 N주기 AOA 위험도 평가 결과(Case 1)

Case 1 : 아연주입 수행(5ppb), 초음파세정 수행, 불시정지 1회 가정								
Result \ EFPD	미수행	50	100	150	200	300	450	결과
Maximum Core Boron Mass (lbm)	0.159 2	0.1758	0.172 2	0.168 1	0.158 3	0.144 3	0.124 9	최대 0.02 lbm 증가
Maximum Crud Thickness (mils)	1.760 3	1.7821	1.778 7	1.773 0	1.770 3	1.747 7	1.715 5	최대 0.02 mils 증가
EOC Ni/Fe Ratio	2.465 5	2.2079	2.206 5	2.208 4	2.209 1	2.227 6	2.174 6	-
EOC Ni Mass (lbm)	5.752 3	8.3219	8.321 9	8.219 7	8.093 1	7.630 7	7.006 5	최대 2.57 lbm 증가

### 제 3 절 위험도 평가 결과 분석

이전 주기(N-3, N-2, N-1)들에 대해 벤치마킹을 한 뒤에 OPR-1000 N주기 AOA 위험도 평가를 수행한 결과 주기 초 50 EFPD 이후 아연주입을 하여도 노심붕소질량의 최대값이 미국 전력연구소(EPRI)에서 권고하는 AOA 발생의 제한값(0.28 lbm)을 초과하지 않는 것으로 평가되어 AOA 발생 가능성이 낮은 것으로 나타났다. AOA 위험도 평가 결과 시 50 EFPD 이후 아연주입이 가능한 것으로 예측되었고, OPR-1000에서의 두 번째 아연주입 시기는 코드 결과보다 보수적으로 100 EFPD 이후가 적절하다고 평가하였다. 이는 N-1주기 평가 결과와 다르며 상당히 중요한 의미를 가진다. OPR-1000 발전소에서 아연주입을 수행할 시 첫 주기에는 주기초에 아연주입을 수행하면 AOA 위험도가 크지만 두 번째 주기에서는 주기초에 아연주입을 수행해도 위험도가 크지 않다. 이는 두 번째 주기부터는 주기초에 아연주입을 수행할 수 있다는 것

을 보여준다. 그러므로 이 코드 결과를 OPR-1000 발전소에 적용하여 초기 아연주입을 주기 중반에 수행하고, 두 번째 아연주입을 주기 초에 수행하여 성공적으로 아연주입 운전을 할 수 있다.

향후 몇몇의 OPR-1000 발전소들은 증기발생기 교체가 예정되어 있고, 축방향출력편차 설계값과 측정값 간의 차이가 지속적으로 증가 추세를 보이고 있어 AOA가 발생할 위험성이 있으므로 축방향출력편차의 거동에 대한 지속적 감시가 필요하다.

## 제 5 장 결론

본 논문은 EPRI에서 개발한 BOA 코드를 이용하여 AOA 위험도 평가 결과를 분석하였으며, OPR-1000 발전소의 N-1주기와 N주기에서의 최적의 아연주입 시기를 제시하였다. 특히 OPR-1000 발전소들은 축방향 출력편차의 설계값과 측정값 간의 차이가 계속적으로 증가하는 추세를 띠고 있으며 AOA가 발생할 위험성이 있기 때문에 본 논문에서 제시한 다음과 같은 AOA 위험도 평가 결과를 적용하여 AOA 위험도를 가장 낮추는 방향으로 OPR-1000 발전소를 운전할 필요가 있다.

- 1) AOA 위험도 평가 결과 OPR-1000 발전소에서 처음으로 아연주입을 수행하는 N-1 주기의 경우, 주기 중반인 200EFPD에서 아연주입을 수행하였을 때 결과로 도출된 노심 붕소질량의 최대값이 EPRI 가이드라인에서 권고한 노심 붕소질량의 최대값 (0.28 lbm)보다 낮으며 AOA 위험도가 낮다. 그러므로 아연주입을 초기에 수행 시 보수적으로 주기 중반에 수행할 필요성이 있다.
- 2) AOA 위험도 평가 결과 OPR-1000 발전소에서 두 번째로 아연주입을 수행한 N 주기의 경우 주기 초 50EFPD에서 아연주입을 수행하여도 노심 붕소질량의 최대값이 EPRI 가이드라인에서 권고한 노심 붕소질량 최대값(0.28 lbm)보다 낮으며 AOA 위험도가 낮다. 그러므로 아연주입을 처음 수행한 주기와는 다르게 두 번째 수행할 시에는 주기 초부터 수행할 수 있다.
- 3) EPRI에서 개발한 BOA 코드를 이용하여 OPR-1000의 AOA 위험도를 분석한 결과 아연주입의 수행시기가 주기 중후반이 아닌 초반에 이루어지거나, 초음파 세정을 하지 않거나, 원자로 운전 중 불시 정지의 횟수가 많아지거나 할수록 노심 붕소질량의 최대값은 증가하며 이에 따른 AOA 위험도는 높아진다. 그러므로 AOA 위험도를 낮추기 위한 방안으로 최적의 아연주입 시기를 찾아 아연주입을 수행하고, 초음파 세정을 O/H마다 수행하며, 발전소 운전 중 예기치 않은 불시 정지가 발생하지 않도록 원자로를 안정적으로 운전할 필요성이 있다.

## 참고문헌

- [1] PWR Axial Offset Anomaly (AOA) Guidelines, Revision 1, EPRI, Palo Alto, CA: 2004. 1008102.
- [2] Boron-induced Offset Anomaly Risk Assessment Tool (BOA) Version 3.1. EPRI, Palo Alto, CA: 2013. 3002000831.
- [3] Characterization of Corrosion Products on the Callaway Cycle 9 PWR Core, EPRI, Palo Alto, CA: 2001. 1003129.
- [4] Pressurized Water Reactor Fuel Impact Assessment for Injecting Zinc at a High-Duty PWR: Callaway, EPRI, Palo Alto, CA: 2003. 1007857.
- [5] W.A. Byers, J. Deshon, Structure and chemistry of PWR crud, International Conference on Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems, San Francisco, 2004.