2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

AOA 원인분석 및 설계적 완화방안 연구

Study on rootcause analysis and reduction method in design base for AOA

우해석, 김재학, 권태제, 김영구, 정일섭, 김선두
한전원자력연료㈜
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

최근 수년간 국내 뿐만 아니라 국외 발전소의 운전자료에 따르면 측정된 수직출력경사도가 설계치에 비해 상당히 음의 방향으로 치우치는 비정상 수직출력경사도 현상이 일부 발전소에서 보고되었다. 일반적으로 냉각재내의 붕소, 부식생성물 및 미포화비등에 의해 비정상 수직출력경사도가 발생한다고 알려져 있으며, 현상의 정도에 따라 안전성의 재평가가 이루어지거나 운전의 제약을 받기도 하였다. 본 연구에서는 수직출력경사도 편차가 비교적 심했던 국내 발전소의 노심 출력분포 측정자료 분석을 통하여 수직출력경사도 편차의 원인이 비정상 수직출력경사도에 의한 현상임을 확인하고 이로 인해 안전성 및 운전에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 비정상 수직출력경사도 원인이 주기초 임계붕소농도와 출력인자의 증가와 관련이 있음을 확인하였으며, 노심설계 관점에서 비정상 수직출력경사도의 방지/완화대책을 제시 및 적용하였으며 근본적인 방지를 위한 향후과제에 대하여 기술하였다.

ABSTRACT

According to recent operational data in nuclear power plants, some plants have experienced Axial Offset Anomaly(AOA) in which the measured axial offset was considerably negative compared with the predicted one. In general, AOA is thought to be related to boron, corrosion product in coolant and the amount of subcooled boiling. In some cases, the safety parameters were reevaluated and power operation was restricted depending on the degree of AOA. In case of domestic plants that presented a rather severe axial offset deviation, it was identified as AOA phenomenon by analyzing the incore flux mapping data, and the associated safety and operation impacts were evaluated. Also, it is found that AOA was

closely related to the increase in critical boron concentration and peak power at the beginning of cycle. For the prevention/reduction of AOA in future cycles, the recommendations are provided and applied in respect of core design base, and future subjects are described.

1. 서론

발전소의 기술지침서에는 사고해석시 가정된 첨두출력인자에 대한 초기조건을 만족하는 지 확인하기 위해 출력분포를 정기적으로 점검하도록 규정되어 있다. 이를 위해 노내계측기를 통해 정해진 주기마다 출력분포를 측정하여 첨두출력인자를 점검하고 평상시에는 노외계측기에 의한 수직출력경사도(Axial Offset, AO)의 감시 및 제어를 통해서 첨두출력인자가 제한치를 만족하도록 하고 있다. 이때 수직출력경사도에 대한 정의는 다음과 같다.[1)]

$$AO = \frac{P_T - P_B}{P_T + P_B}$$

여기서 P_T는 상부의 노심출력, P_B는 하부의 노심출력

일반적으로 재장전노심에서의 AO 는 주기초의 경우 상부의 노심출력이 하부의 노심출력보다 더 큰 양(+)의 값을 보이다, 연소가 진행되면서 점차 음(-)의 값을 보이는 경향을 나타내며, 지금까지 측정된 AO 는 설계치와 유사한 경향을 보여왔다. 그러나 최근 수년간 국내 뿐만 아니라 국외 발전소의 운전자료에 따르면 측정된 AO 가 설계치에 비해 통상 3% 이상 음의 방향으로 치우쳐 상대적으로 하부의 노심출력이 증가하는 비정상 수직출력경사도(Axial Offset Anomaly, AOA)라 불리는 현상이 발생된 바 있다. 국외의 경우 여러 차례에 걸쳐서 AOA 가 발생한 바 있으며, AO 의 측정치와 설계치와의 차이가 작을 경우에는 별도의 안전성 평가나 운전 제약없이 기존의 정지여유도로서 관리되지만, 사례중 최대 15%까지 편차가 발생한 경우에는 추가적인 정지여유도를 확보하기 위해 장기간 저출력 운전을 한 것으로 보고되었다.[2)]

본 연구에서는 주기연소도에 따른 AO 거동이 AOA 현상을 보인 노심에 대하여 노심의 출력분포 측정자료와 설계자료를 분석하여 AOA 현상으로 인한 거동인지를 확인하고, 그에 따른 안전성 및 운전의 영향을 검토하였다. 또한, 주요인자들 (임계붕소농도, 출력분포, 부식산화물 등)의 면밀한 검토를 통하여 AOA 를 일으키는 발생원인을 찾아내고, 노심설계 관점에서 AOA 에 대한 방지/완화대책을 제시하여 이를 적용하였으며, 근본적인 방지를 위한 향후과제에 대하여 기술하였다.

2. 본론

2.1. AOA 현상

AOA 현상을 보였던 발전소의 연료를 검사한 결과 [3]에 의하면 17x17 연료의 경우 연료의 상부인 5, 6 번 그리드 및 중간유동혼합 그리드의 밑부분에 크러드가 많이 침적되어 있는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 출력이 높은 집합체의 상부에 미포화비등(Subcooled Boiling)이 더욱 많이 발생하므로 냉각재에 녹아있는 부식물이 미포화비등이 발생하는 연료봉 상부 피복관에 집중적으로 침적되기 때문으로 알려져 있다. 또한, 그리드로 인한 냉각재 혼합 효과가 줄어드는 다음 상부 그리드까지의 길이에 따라 그 두께는 증가된다. 이때 침적된 크러드 속에 냉각재의 붕소가 함께 침적되면서 노심 상부의 중성자를 흡수함으로써 상부의 노심출력이 억제되고, 이로 인해 노심출력이 하부로 치우치게 된다.

일반적으로 AOA 현상은 원자로 기동후 4~6 개월 정도부터 AO 측정치가 설계치 보다 3% 이상 음의 값을 보이는 증상이다. 그림 1 에 나타낸 바와 같이 국내의 한 노심에서 측정 AO 의 거동이 전형적인 AOA 의 거동과 유사하여 [3], 이와 같은 AO 의 거동이 AOA 에 의한 현상인 지 또는 다른 요인에 따른 현상인 지 확인하기 위해 출력분포 측정 자료를 분석하였다. 먼저 월간단위로 진행되고 있는 노내 핵계장 계통을 이용한 노심출력분포 측정자료를 이용하여 AOA 가 발생한 주기의 운전자료중 AO 의 측정치와 설계치와의 편차를 비교한 결과, 그림 2 와 같이 집합체의 출력이 높을수록 AO 편차가 증가하는 경향을 보였다. 한편, 주기초에서는 주로 재사용 연료가 편차가 큰 반면, 연소가 진행될수록 신연료도 설계치와의 편차가 점차 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 편차가 큰 특정 집합체에 대하여 연료의 높이에 따른 출력분포를 분석한 결과, 신연료 상태에서는 출력분포가 정상적인 형상을 나타내다가 연소가 진행되면서 상부출력이 비정상적으로 눌려지는 현상이 점차 심해지는 것을 그림 3 과 같이 확인할 수 있었다. 그림 3 에서 보는 바와 같이 연료의 상부에 있는 몇 개의 그리드 하부에서 출력이 급격히 감소되는 현상이 나타난 것을 알 수 있다. 이는 일반적으로 AOA 노심에서 크러드의 두께가 특정 그리드에서 상부쪽으로 갈수록 증가되고 따라서 크러드에 침적되는 붕소화합물이 증가되는 현상을 집합체 출력분포 측정자료가 보여주고 있는 것이다.

연소도에 따른 노심평균 AO 거동 (그림 1), 집합체의 출력이 높을수록 AO 편차가 증가하는 현상 (그림 2) 및 연료 상부의 각 그리드 사이에서 그리드의 상부쪽으로 갈수록 출력이 감소되는 현상 (그림 3)과 같은 분석 결과 AO 의 거동이 명백히 AOA 에 의한 것으로 판단하였다.

2.2. AOA 원인 분석

AOA 는 부식생성물의 증가, 미포화비등 증가로 인한 기포발생률 증가, 노심의 임계붕

소농도 증가 및 크러드가 침적되기 용이한 수질의 화학적 조건 등이 복합되어 발생되는 것으로 알려져 있다 [3]. 국내 3-루프 노심의 경우 열적 성능이 향상된 V5H 연료 사용과 더불어 설계 기술의 향상으로 첨두출력인자 ($F_{\Delta H}$) 제한치가 완화되어 초 저누출 장전모형을 채택함으로써 그림 4 와 같이 노심 내부의 출력은 상승하였으며 노심 외곽의 출력은 감소되어 과거주기에 비해 노심 내외곽의 출력 편차가 증가하게 되었고, 높아진 출력만큼 미포화비등이 증가하게 되었다. 또한, 경제성 추구에 따른 장주기 주기운용 전략 채택으로 주기길이와 주기초 임계붕소농도 (그림 5, 6 참조)가 단주기에 비해 약 30% 정도 증가되었다. [4]

반면 발전소 설비의 노후화로 노심과 관련된 1 차 계통중 특히 단면적의 비중이 큰 증기발생기 세관의 부식이 증가되어 관막음이나 슬리빙 비율이 계속 증가하고 있는 실정이다. 장주기로 인한 임계붕소농도의 증가와 함께 냉각재 내의 부식생성물 증가는 1 차 계통의 수질 관리를 어렵게 할 뿐만 아니라, 고연소된 연료봉의 산화 및 부식물 침적을 증가시키고 있다.

이와 같이 경제성 위주의 노심운용 전략이 AOA 를 발생시키기에 적합한 노심 조건을 갖추어 주었기 때문에 수질관리와 같은 운전조건에 따라 노후화된 발전소 설비에서 발생된 크러드가 침적되어서 AOA 를 발생시킨 것으로 볼 수 있다.

2.3. AOA 발생에 따른 안전성

AOA 현상이 발생되고 있는 노심과 관련된 안전성 인자는 정지여유도이며, 운전 관점에서는 첨두출력인자 등 기존의 안전성이 유효하도록 노심의 출력분포를 주어진 범위내로 적절히 제어하는 것이다. AOA 를 발생시킨 붕소화합물이 포함된 크러드가 출력이 변동되거나 원자로가 정지되면 미포화비등의 감소로 인해 연료봉 피복관으로부터 떨어져 냉각수내로 용해되어 나오면서 노심상부에서 정(+)반응도가 삽입되는 효과를 주며, 노심하부의 과다 연소 및 지논 분포로 인한 출력 재분포 효과로 인해 노심에 추가로 정(+)반응도가 삽입되어 정지여유도가 급격히 감소된다. AOA 가 심하게 발생된 발전소에 대해서는 노심에 삽입된 정(+)반응도 만큼의 정지여유도가 추가로 필요하게 된다. 따라서 AOA 발생 노심에서 정지여유도 확보가 안될 경우 저출력 운전을 해야할 필요성이 발생하게 된다. 국내에서 AOA 현상을 보인 노심의 경우 그 정도가 비교적 작았기 때문에 충분한 정지여유도를 가지고 있는 것으로 평가되었다.

출력분포 제어 측면에서는 AOA 발생 노심의 출력이 감소되거나 정지될 때 크러드가 냉각재에 용해되어 중성자 흡수물질이 노심의 상부에서 없어지기 때문에 축방향 출력분포가 급격하게 상부로 치우치게 되어 제어하기가 어렵다. 또한, AOA 발생중 전출력 운전중에는 첨두출력인자 (F_Q)를 측정하기 위해 기술지침서에 정해진 운전범위내에서 부하추종을 모사하여 생산된 W(z) 함수가 심한 AO 의 편차로 인해 더 이상 유효하지 않

을 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 W(z)함수를 재생산해야 한다.

2.4. AOA 발생 방지 및 완화 대책

AOA 를 방지 또는 완화시키기 위해서 핵설계 측면에서는 노심장전모형 선정시 가능한 집합체의 열적 부담을 낮추어 미포화비등 양을 줄이고, 가연성 흡수봉의 사용량을 조절하여 가능한 주기초 임계붕소농도를 낮추는 것이 바람직하다.

AOA 로 추정되는 국내 원자력발전소 사례중 하나를 선정하여 위에서 언급한 핵설계 측면에서의 AOA 방지/완화 대책을 AOA 발생이후 후속주기(N 주기)에 적용하였으며, 주기별 노심의 주요인자 비교는 다음과 같다.

노심 주요인자		N - 1 주기	N 주기
주기길이(MWD/MTU)		18140	16110
WABA 사용량(개수)		928	896
임계붕소농도(ppm)	주기초(0 MWD/MTU), 영출력	2322	2066
	주기초(0 MWD/MTU), 전출력	2109	1840
	주기초(150 MWD/MTU), 전출력	1675	1407
$F_{\Delta H}$	주기초(0 MWD/MTU), 영출력	1.519	1.463
	주기초(0 MWD/MTU), 전출력	1.469	1.434
	주기초(150 MWD/MTU), 전출력	1.463	1.419

위의 표에서 알 수 있듯이, 주기길이의 차이가 있음에도 거의 같은 수의 가연성 흡수봉을 사용하여 주기초 임계붕소농도와 첨두출력을 각각 약 250ppm, 약 3% 정도 낮추었으며, 주기초 집합체별 평균 출력(그림 7)도 1.3 을 넘지 않도록 설계하였다. 또한, 이전주기의 일관된 AO 편차 (그림 1)로 인해 주기초 AO 가 노심의 상부로 치우칠 가능성이 있으며, 이 현상에 대한 예측을 적절히 하기 위해 이전주기 3 차원 노심연소계산시 측정 AO 거동을 고려하였다. 그림 8 에는 AOA 완화책이 적용된 후속주기 노심의 AO 거동을 나타냈다. 이전주기와 마찬가지로 주기초의 AO 예측치가 측정치와 약간의 차이를 보이는 것은 제어봉을 이용한 이전주기 AO 거동모사로 인한 노심현상이 실제 AOA 현상을 일으킨 붕소를 포함하는 크러드로 인한 노심현상과 노심평균 AO 는 유사하더라도 각각의 집합체에 대한 영향이 다를 수 있기 때문인 것으로 보인다. 그러나 주기중반 이후 측정 AO 거동이 설계치와 비교적 일치하는것으로 보아 핵설계측면에서의 AOA 방지/완화 대책이 유효한 방법중 하나임을 보여준다.

이와 같이 주기초 임계붕소농도, 첨두출력 및 집합체 출력을 최대한 낮추는 장전모형을 선정하여 후속주기에서의 AOA 발생 가능성을 완화시켰지만, 이에 대한 기준이 없을 뿐만 아니라 실제 운전시 수질관리에 대한 가변성 등의 이유로 AOA 의 발생 가능성은

여전히 존재 할 수 있다. 따라서 AOA 가능성 및 정도를 진단할 수 있는 새로운 방법론 구축과 AOA 발생의 근본적 원인이 되는 크러드 발생을 억제할 수 있는 수질관리 개선책 마련 등이 추가로 필요하다.

3. 결론 및 향후과제

주기연소도에 따른 AO 거동이 전형적인 AOA 현상을 보인 노심에 대하여 출력분포 측정 자료 분석을 통하여 AOA 로 인해 AO 측정치가 실측치와 차이를 보인 것으로 확인되었다. AOA 의 정도가 비교적 작아 정지여유도와 같은 안전성에 미치는 영향은 무시할 정도였으며, 전출력 운전중에도 첨두출력인자 (F_Q) 측정치가 기술지침서에 규정된 제한치를 만족하는 지 확인하기 위해 설계측에서 제공하는 W(z) 함수도 기존의 제공된 것이 여전히 유효한 것으로 확인되었다.

연료 장전 이력 및 적용된 노심주기계획을 검토한 결과 AOA 가 발생된 요인은 V5H 장전 및 진보된 설계 방법론 적용으로 인한 첨두출력인자 ($F_{\Delta H}$) 제한치가 완화되어 초저누출 장전모형을 적용하였기 때문에 집합체의 출력이 증가되어 미포화비등이 증가된 상태에서, 장주기 전략 채택으로 높아진 주기초 잉여반응도 증가에 따른 임계붕소농도가 발전소 설비 노후화에 따라 발생된 크러드에 침적되었기 때문인 것으로 확인되었다. 따라서 AOA 를 방지/완화하기 위해서 핵설계 측면에서는 가능한 집합체의 열적 부담을 낮추어 미포화비등 양을 줄이고, 가연성 흡수봉의 사용량을 조절하여 주기초 임계붕소농도를 가능한 낮추는 것이 바람직하다.

AOA 로 추정되는 국내 원자력발전소 사례중 하나를 선정하여 위에서 언급한 핵설계 측면에서의 AOA 방지/완화 대책을 적용하기 위해 주기초 임계붕소농도, 첨두출력 및 집합체 출력을 최대한 낮추는 장전모형을 선정하여 후속주기에서의 AOA 발생 가능성을 완화시켰지만, 이에 대한 기준이 없을 뿐만 아니라 실제 운전시 수질관리에 대한 가변성 등의 이유로 AOA 의 발생 가능성은 여전히 존재 할 수 있다. 아직까지 국내 원자력발전소의 AOA 발생 빈도 및 증상이 해외에 비해 미미하지만, 발전소 설비의 노후화에 따른 부식생성물의 증가, 개량핵연료 개발을 통해 첨두출력인자 제한치 완화, 장주기 운전 그리고 출력증강 등으로 인해 AOA 발생 가능성은 더욱 증가할 수 밖에 없는 상황이다. 따라서 AOA 를 방지/완화하기 위한 향후 과제로 설계측면에서는 AOA 가능성을 진단할 수 있는 방법론 구축과 AOA 의 정도를 평가할 수 있는 기준 선정 및 정확한 AOA 모델링 등에 대한 연구가 필요하고, 또한 AOA 발생의 근본적인 원인이 되는 크러드 발생을 억제할 수 있는 수질관리 강화나 제거 장비 개발 등 다각적인 연구가 요구된다.

참고문헌

1. “고리 3&4 호기 최종안전성분석보고서,” 한국수력원자력㈜.

2. “High - Energy Cores Experience at Westinghouse,” Proceedings of INCORE 8 (2000).
3. “Axial Offset Anomaly Technical Seminar,” March 4, 1999, Westinghouse.
4. “900Mwe 급 경수로 장주기 운전 타당성 연구 보고서,” 한국전력공사 (1990).

그림 1. AO 추이 비교 (N-1주기)

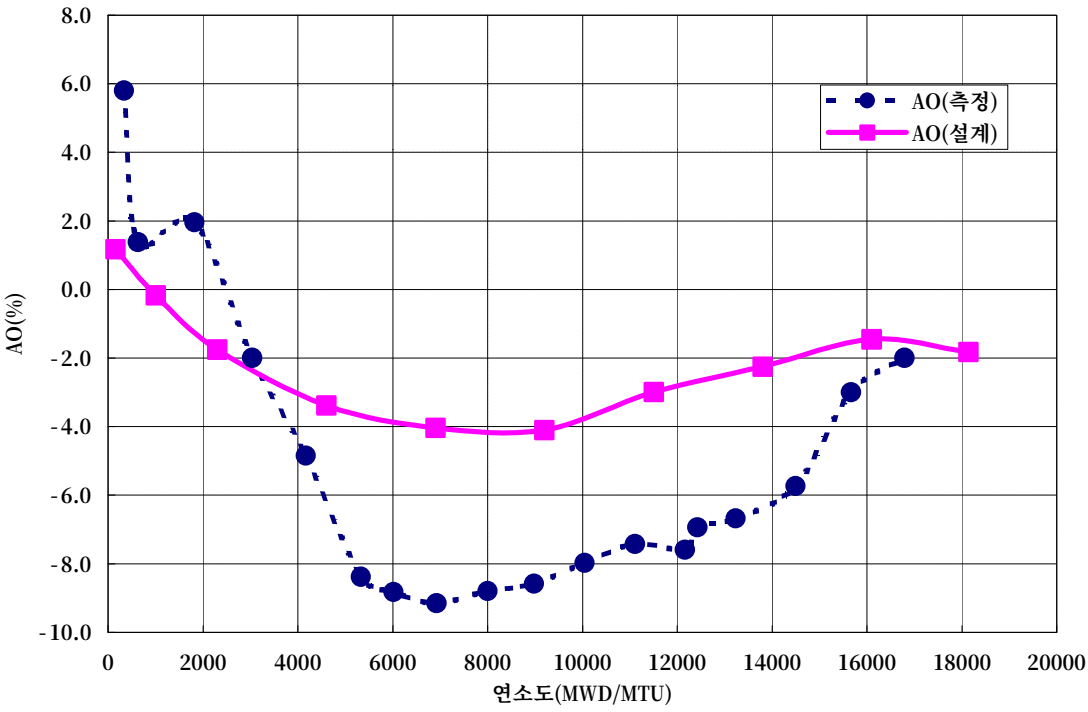

그림 2. 출력에 따른 AO편차

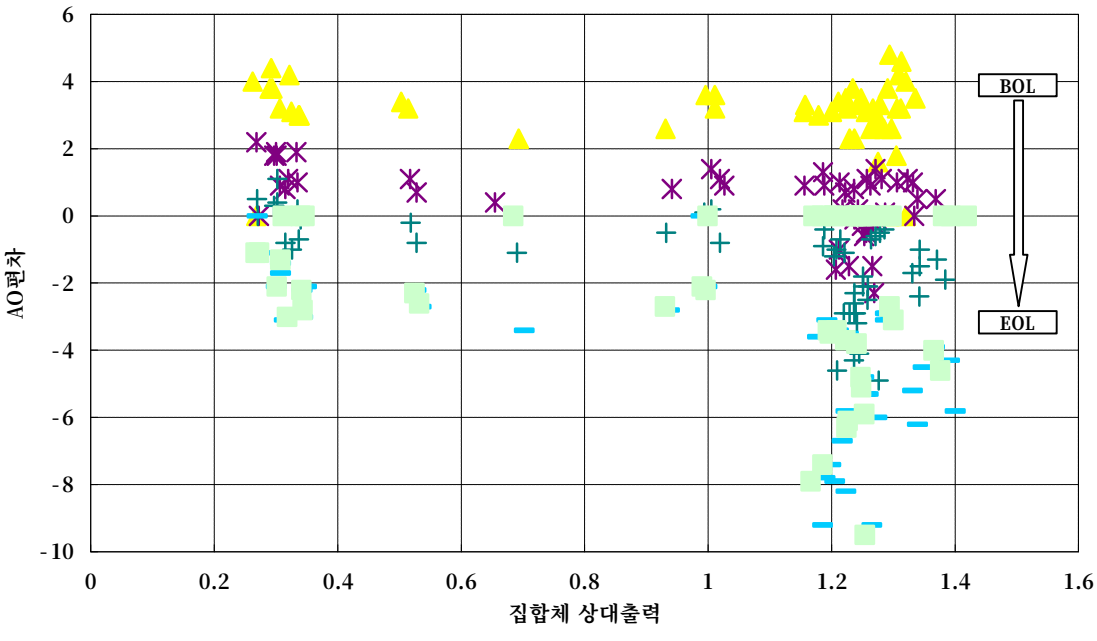

그림 3. Flux Trace

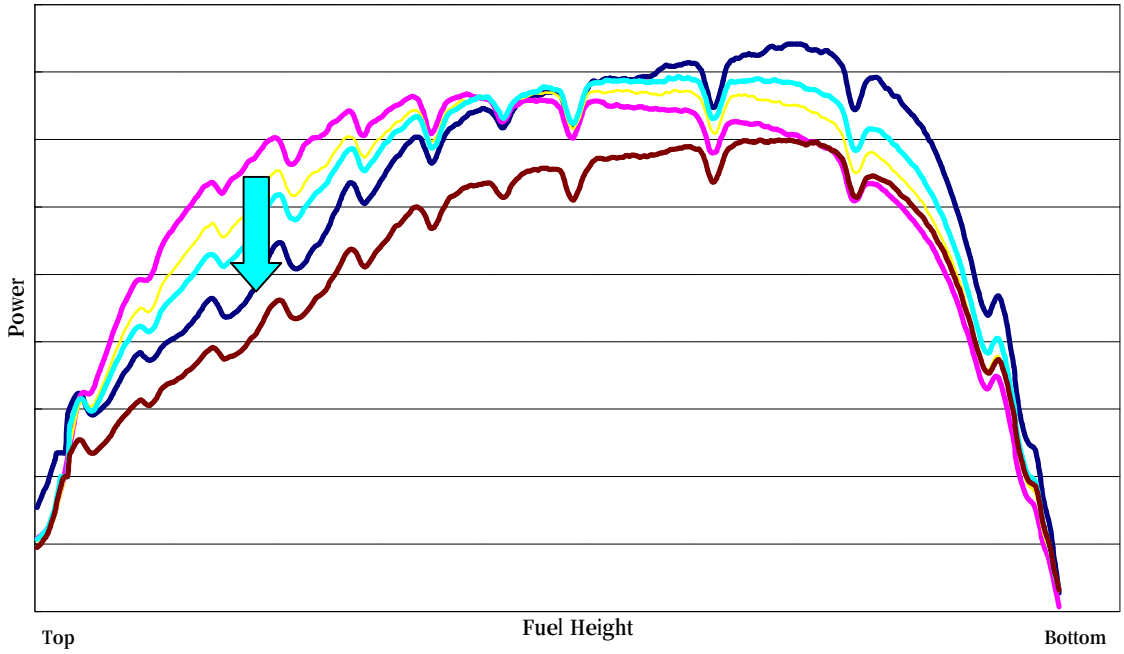

그림 4. 집합체 상대출력분포도 비교

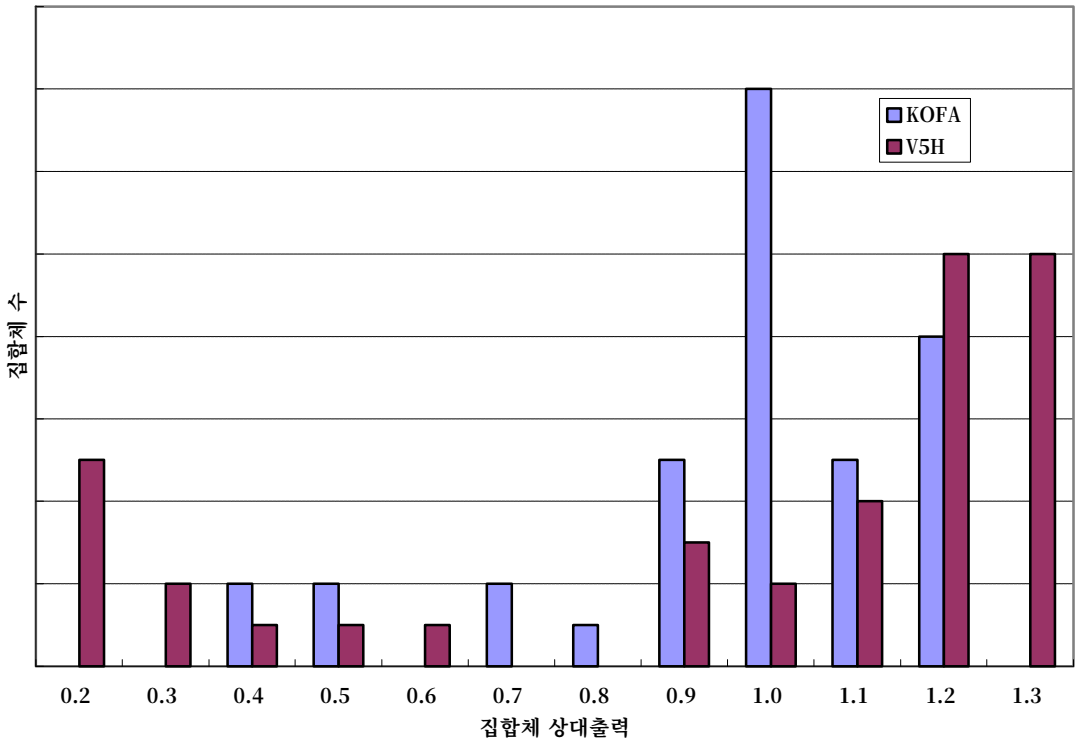

그림 5. 주기길이 비교

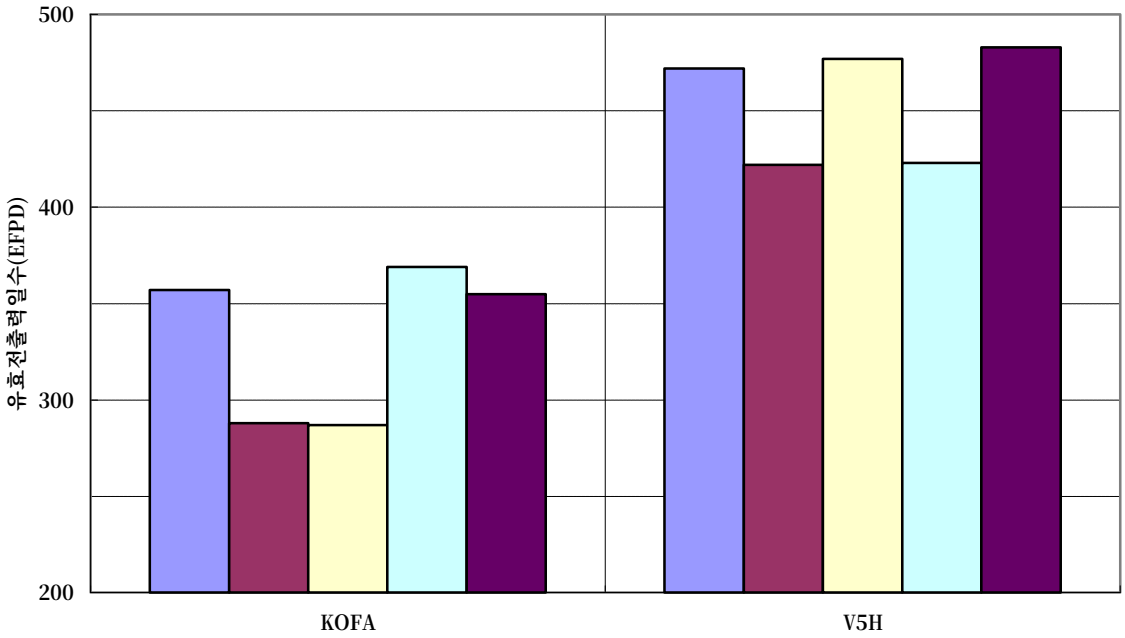

그림 6. 주기초 임계붕소농도 비교

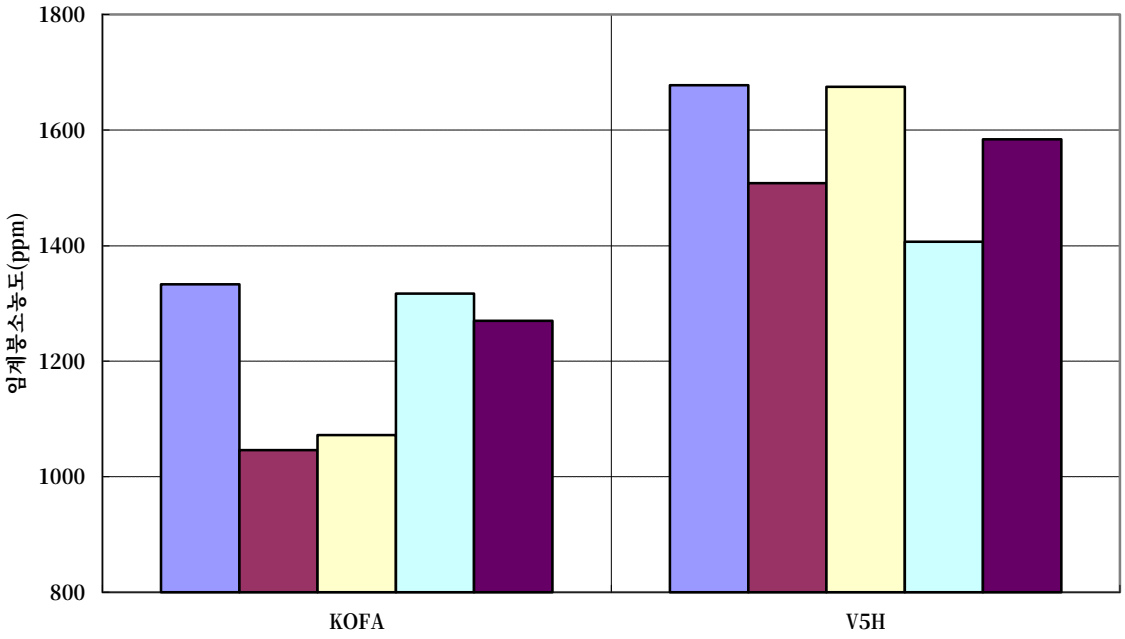

그림 7. N-1과 N주기 집합체 상대출력분포도 비교

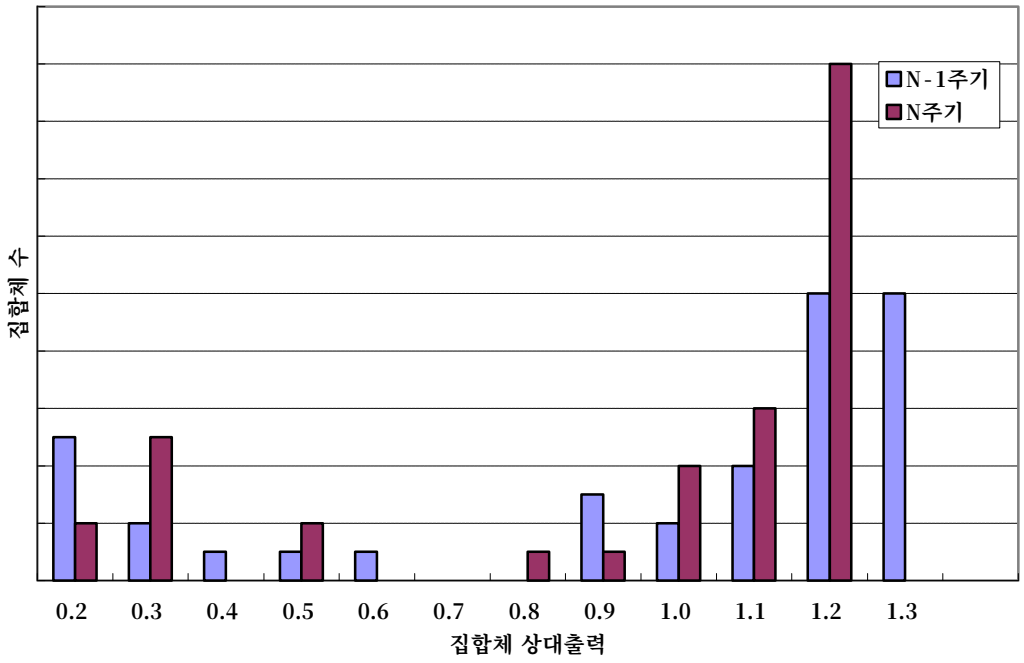

그림 8. AO 추이 비교 (N주기)