

## WH형 가압 경수로에서의 B<sup>10</sup> 연소 거동 평가 (II) (Evaluation II of B<sup>10</sup> Depletion in the WH PWR)

박상원, 우해석, 김선두  
한전원자력연료(주). 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

채희동, 명선엽, 장주경  
한국전력(주), 경북 울진군 북면 부구리

### 요 약

본 연구에서는 국내의 웨스팅하우스형 발전소에 대한 노심 내의 B<sup>10</sup> 연소 거동을 평가하는 방법에 대한 논의를 하였다. 또한, 예측 프로그램과 실제 측정된 자료를 근거로 B<sup>10</sup>의 연소거동을 평가하였다. 그 결과 B<sup>10</sup> 연소에 따른 노심 내의 붕소 농도 거동의 변화가 상당한 수준이라는 것을 알 수 있었다. 따라서, 예상 임계 위치 계산 및 정지 여유도 붕소량 결정시에 B<sup>10</sup> 연소에 대한 효과가 반영되어야 할 것으로 판단된다.

### Abstract

This paper presents the methodology to evaluate the B<sup>10</sup> depletion behavior in the pressurized water reactor. And B<sup>10</sup> depletion evaluation is performed based on the prediction program and the measured data of B<sup>10</sup>. The result shows that B<sup>10</sup> depletion during normal operation is not negligible. Therefore, adjustments for this depletion effect should be made to calculate the estimated critical position(ECP) and determine the boron concentration required to maintain the specified shutdown margin.

### 1. 서론

현재 대부분의 PWR에서는 연료의 연소에 따른 반응도 변화 및 상대적으로 느린 반응도 변화를 보상하기 위해서 수용성 붕소가 사용되고 있다. 진출력, 제어봉 완전인출, 평형제논상태에서의 임계 붕소농도는 주기초에 약 1500 ppm에서 주기말에는 10 ppm 정도로 변화하게 된다. 일반적으로 설계상의 B<sup>10</sup> 함량은 자연 상태의 값 또는 과거 주기초 RCS나 RWST(Refueling Water Storage Tank)에서 측정된 값이 사용되며 연소도에 따른 B<sup>10</sup> 함량은 일정하다고 가정하고 설계된다. 장주기 운전 전략과 경제성을 위한 가능한 소량의 가연성 흡수봉의 사용에 따라 주기초 임계붕소농도의 상승은 노심내에서 B<sup>10</sup> 연소에 의한 임계 붕소 농도의 설계값과 측정치간의 편차를 심화시킬 수 있다. 한편 운전 중에 불시 정지 또는 기타 이유로 붕소를 원자로 계통내에 새로 추가하면 B<sup>10</sup> 연소는 부분적으로 보상될 수가 있다. 따라서 노심 내의 B<sup>10</sup> 연소 거동은 운전 이력에 따라 달라 질 수 있으므로 사전에 이에 대한 거동을 예측하여 설계에 반영하기는 쉽지 않다. 한편, 주기초 원자로 특성 시험의 붕소 농도 편차 판정 기준으로 50 ppm을 사용하고 있고, 울진 1, 2호기의 경우는 운전중에도 50 ppm 이상의 편차가 발생할 경우, 이에 대한 원인규명을 요구하고 있다. 이전의 연구논문<sup>[1]</sup>에서 개발된 B<sup>10</sup> 연소 거동 프로그램의 결과에 의하면 운전 중 노심 내에 추가되는 붕소가 없을 경우, 이로 인한 붕소 농도 편차는 최대 100 ppm 까지 나타날 수 있음을 밝힌 바 있다.

따라서 이를 검증할 수 있는 측정 자료를 분석하여 임계붕소농도의 설계값과 측정값의 차이를 규명하고 이를 예상 임계도 위치 및 발전소 정지여유도 계산에 반영하는 것과 주기적인 측정의 필요성을 강조하는데 그 목적을 두고 있다.

## 2. 본론

### 2.1 B<sup>10</sup> 연소 예측 프로그램

B<sup>10</sup> 및 B<sup>11</sup>의 연소 거동을 묘사하는 방정식은 붕소주입 및 희석을 고려하였을 때 다음과 같이 주어진다<sup>[1]</sup>.

$$\frac{dB^{10}}{dt} = -(\sigma_{a1}\phi_1 + g\sigma_{a2}\phi_2) \cdot B^{10} \cdot \frac{V_R}{V_T} + \frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} \cdot A \cdot \alpha - \frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} \cdot B^{10} - \frac{\nu_D}{V_T \cdot \rho} \cdot B^{10}$$

$$\frac{dB^{11}}{dt} = \frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} \cdot A \cdot (1 - \alpha) - \frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} \cdot B^{11} - \frac{\nu_D}{V_T \cdot \rho} \cdot B^{11}$$

여기서,

B <sup>10</sup> = B <sup>10</sup> concentration	$\nu_B$ = boration rate per hour
B <sup>11</sup> = B <sup>11</sup> concentration	$\nu_D$ = dilution rate per hour
g = disadvantage factor	A = boron concentration in Boric Acid Tank
V <sub>R</sub> = core coolant volume	$\alpha$ = B <sup>10</sup> percentage in natural boron
V <sub>T</sub> = total primary coolant volume	$\rho$ = primary coolant density

이에 대한 해는 간단히 구해질 수가 있고 이는 아래와 같다.

$$B^{10}(t) = C_1 \exp \left[ - \left\{ (\sigma_{a1}\phi_1 + g\sigma_{a2}\phi_2) \frac{V_R}{V_T} + \frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} + \frac{\nu_D}{V_T \cdot \rho} \right\} t \right]$$

$$+ \frac{\frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} \cdot A \cdot \alpha}{\left[ (\sigma_{a1}\phi_1 + g\sigma_{a2}\phi_2) \frac{V_R}{V_T} + \frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} + \frac{\nu_D}{V_T \cdot \rho} \right]}$$

$$B^{11}(t) = C_2 \exp \left[ - \left( \frac{\nu_B + \nu_D}{V_T \cdot \rho} \right) t \right] + \frac{\frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} \cdot A \cdot (1 - \alpha)}{\frac{\nu_B + \nu_D}{V_T \cdot \rho}}$$

상기식에서 필요한 붕소 주입률, Boric Acid Tank(BAT)에서의 붕소농도 등은 발전소의 운전 자료를 사용하여 계산에 반영할 수 있으며, 중성자 속과 붕소의 흡수 단면적 등은 3D ANC<sup>[4]</sup>에서의 계산값을 근거로 계산에 사용하였다.

### 2.2 측정자료

국내 WH형 발전소에 대하여 '95.11 ~ 현재까지 총 48회의 B<sup>10</sup> 자료를 한국 표준 과학 연구원에 의뢰하여 측정하였으며 이 중 RCS가 38회, RWST가 7회, Pressurizer 2회 및 BAT 1회이다. 연소도로 볼 때는 약 50%가 주기 초 자료인데 이는 측정의 목적이 주로 원자로 특성

시험과 연관되었기 때문이다. 따라서, 특정 한 주기에 걸친 많은 자료를 측정하지는 못하였다. 이 중 고리 1호기 15주기, 영광 1호기 9주기 및 고리 4호기 10주기의 경우는 각각 한 주기에 걸쳐 3 point의 측정자료를 획득하였다.

### 2.3 계산결과

그림 1은 전 발전소에 대한 주기초의 RCS 및 RWST의 측정된  $B^{10}$  Percent를 그림으로 나타내었으며 16개의 자료를 평균한 결과 19.66 a/o를 얻었다. 이는 원자로 특성 시험시 설계치를 소위 자연 존재비라고 하는 19.80 a/o로 사용하는 경우에 비하여 약 15 ppm 정도의 오차를 보일 수 있는 양으로 작지 않음을 알 수 있다. 그림 2는 운전 중에 노심에 추가되는 붕소가 없다고 가정하였을 때의 예측 프로그램의  $B^{10}$ 과 실제 측정된  $B^{10}$ 의 연소율비를 측정 연소도에 따라 그림으로 나타내었다. 또한, 이 측정  $B^{10}$  Percent는 불시 정지가 발생되어 노심 내의 많은 붕소가 주입된 자료는 배제하였다. 이 결과로부터 연소도가 작은 영역 (약 4,000 MWD/MTU 까지)에서는 이론적 100% 연소 (붕산수의 추가주입을 고려하지 않은 전출력, 전제어봉 인출 운전 조건에서의 연소를 의미) 보다도 더 크게 연소되거나 100%에 가깝게 연소되고 그 이후에는 약 50% 정도만 연소되는 것으로 나타났다. 이는 여러 가지로 원인을 추측해 볼 수 있는데, 주기 초에 노심내에 붕소를 투입하여야 할 경우가 발생되었을 때, 재사용된 붕소가 투입될 가능성이 있다거나 주기 초에는 노심내에 붕소가 주입되는 경우가 적을 가능성 및 측정값의 불확실도에 기인되는 것으로 추측할 수 있다. 이에 대한 상세한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 그림 3의 경우는 고리 1호기 15주기의 연소도에 따른 붕소의 주입이 전혀 없다는 가정하의 예측치와 실제 측정치간의 비를 그림에 나타내었다. 주기중의 결과는 약 65%의 연소를 보였고, 주기말 부근에서는 약 50% 정도의 연소율을 나타내었다. 그림 4는 그림 3과 마찬가지로 고리 4호기 10주기에 대하여 나타내었다. 주기중 및 주기말에 측정된 결과에 의하면 약 50% 정도의 연소율을 보이고 있다. 이는 불시 정지와 같은 노심내의 극심한 붕소 투입이 없어도 운전 중에 발생할 수 있는 붕소 투입으로 인해  $B^{10}$  Percent의 연소가 보상이 되고 있다고 말할 수 있다. 그림 5는 영광 1호기 9주기의 경우로 실제 발전소에서 운전 중 주입된 붕소량을 추적하여 예측 프로그램과 측정치간의 차이를 비교하여 보았다. 전체적으로 예측 프로그램의 70% 정도의 비율로 연소된 것으로 측정되었다. 이 그림의 연소도 약 9,000 MWD/MTU을 살펴보면, 불시 정지로 주입된 붕소의 영향으로 인한  $B^{10}$  Percent가 증가 (18.17 → 18.63 a/o)되는 현상을 볼 수 있고, 그 연소도 좌우에서 측정된 자료로부터 그 현상을 검증할 수 있었다. 특히, 이 때의  $B^{10}$  Percent의 증가로 인한 붕소 농도 차이는 20 ppm으로 이는 Lead Bank D의 총 반응도가의 50% (영광 1,2 및 고리 3,4호기)를 차지하므로 불시 정지 후에 재기동을 위한 예상 임계 위치를 찾을 경우,  $B^{10}$  Percent의 변화를 고려하지 않는다면 그 오차는 매우 클 것으로 판단된다. 마지막으로 그림 6은 울진 2호기 8주기의 설계치와 측정치 간의 붕소 농도 차이와 100%의  $B^{10}$  연소가 이루어질 때의 붕소 농도 편차를 각각 도시화하였다. 울진 2호기 8주기의 경우, 3 point의  $B^{10}$  측정이 있었는데 연소도로 0, 1,288, 3,800 MWD/MTU으로 주기초에서 이루어 졌고, 1,288 MWD/MTU은 이론적인  $B^{10}$  연소량의 137%, 3800 MWD/MTU은 94%의 연소가 된 것으로 측정되었다. 따라서, 주기초의 연소도에 따른 측정 붕소 농도가 설계 붕소 농도 보다 크게 나타나는 것은 주기초의  $B^{10}$  연소 거동과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 또한, 이 그림에서도 알 수 있듯이 7,800 MWD/MTU의 부근에서의 불시 정지로 인한 그 이전과 이후의 측정 붕소 농도 차이가 22 ppm을 보였다. 이는 그림 5의 불시 정지와 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 국내의 웨스팅하우스형 발전소에 대해  $B^{10}$ 의 연소거동을 모사하는 프로그램과 실제 노심 내의  $B^{10}$  Percent를 측정하여 비교 검토하였다. 그 결과로부터  $B^{10}$  연소로 인한 노심 내의 붕소 농도 변화는 매우 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 다음과 같은 조치 사항이 필요할 것으로 판단된다.

발전소에서의 주기적(분기에 1회 정도)인  $B^{10}$  측정을 실시하여 그 변화를 추적하여 측정된 붕소 농도를 보정하여 설계치와 비교하며, 불시 정지 후의 재기동을 위한 예상 임계 위치를 결정하는데 사용한다. 또한, Mode 3이하에서의 정지 여유도 계산시 사용되는 핵설계 보고서 자료는  $B^{10}$  연소로 인한 붕소 농도의 증가를 반영하고 있지 않아 비보수적인 결과를 초래할 수 있으므로 이를 정지 여유도 계산시에 적절히 반영할 수 있는 방법을 강구하여야 할 것이다.

### REFERENCES

1. "가압 경수로에서의  $B^{10}$  연소 거동 평가," '97 춘계 한국원자력학회
2. "Evaluation of Boron-10 Depletion During Pressurized Water Reactor Operation," N. Asai, et. al., American Nuclear Society, August, 1983
3. "Predicting  $^{10}B$  Depletion in Soluble Boron of LWR Coolant Systems," R.W. Brock, R. D. Kliewer(B&W), American Nuclear Society, Volume 71, 1994
4. WCAP-10956-P-A, "ANC : A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code," Y.S. Liu et. al., September, 1986

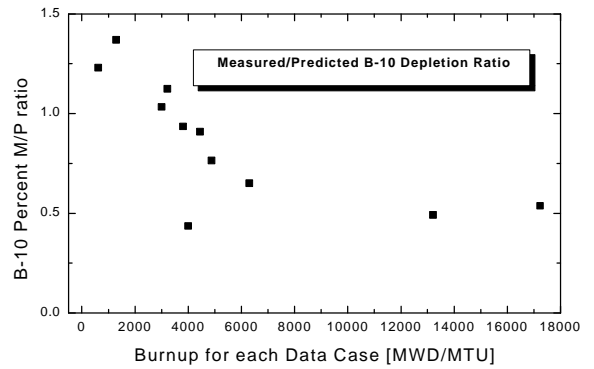
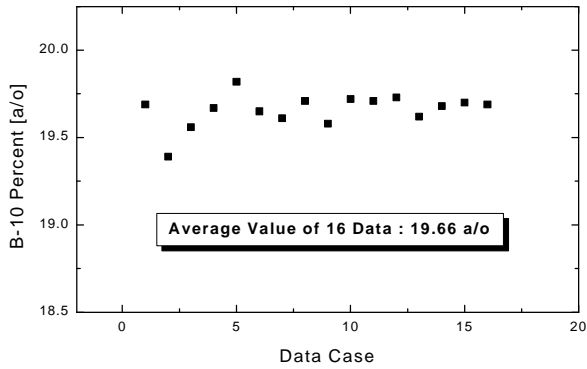


그림 1. 주기초 또는 RWST B<sup>10</sup> 농도 측정 결과      그림 2. 주기 중 측정된 B<sup>10</sup>의 예측치에 대한 측정치의 비

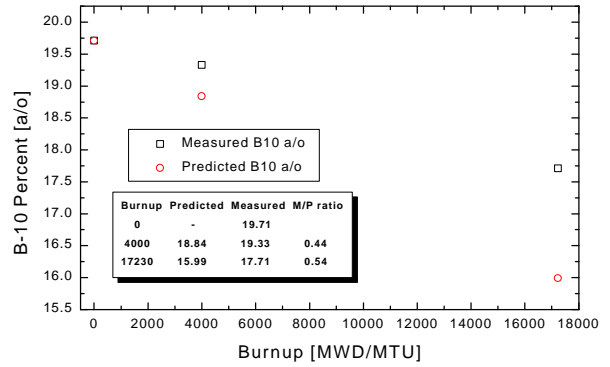
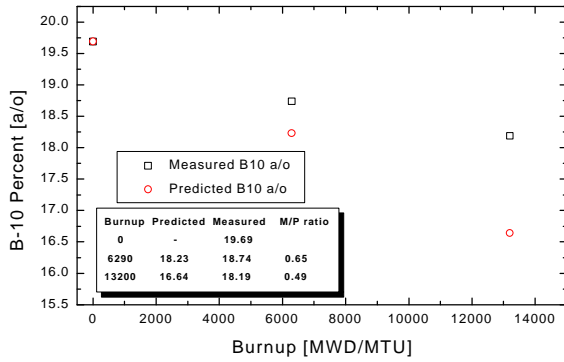


그림 3. 연소도에 따른 B<sup>10</sup> 농도 변화 (K1C15)

그림 4. 연소도에 따른 B<sup>10</sup> 농도 변화 (K4C10)

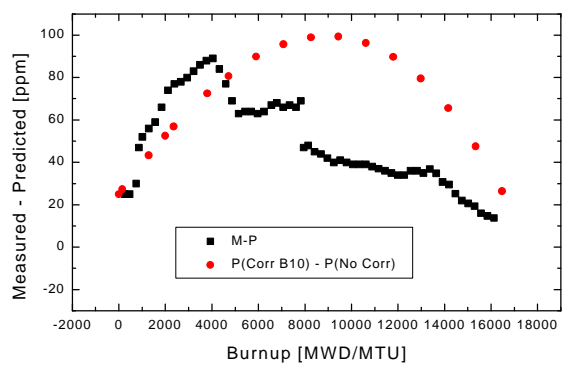
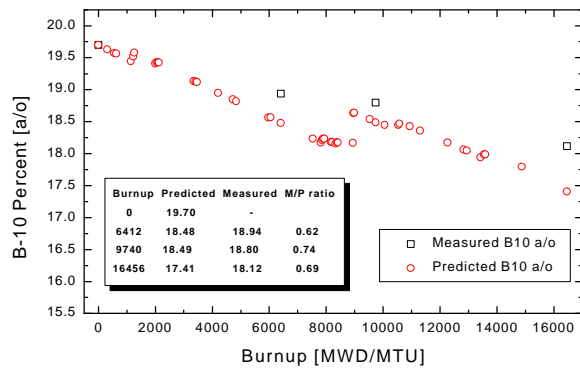


그림 5. Boration을 고려한 연소도에 따른 B<sup>10</sup> 농도 변화 (Y1C9)      그림 6. 연소도에 따른 임계 붕소 농도 편차 (U2C8)