

'97 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가압 경수로에서의 B^{10} 연소 거동 평가

이해찬, 박상원, 장도익, 정선교
한국원전연료(주)

요약

현재 PWR에서는 반응도 변화를 보상하기 위해서 강한 중성자 흡수체인 수용성 봉소가 사용되고 있고 수용성 봉소내의 B^{10} 은 연소하게 된다. 최근 대부분의 발전소가 장주기 운전전략을 채택하고 있고 발전소 이용률이 증가되고 있어 B^{10} 연소의 중요성이 부각되고 있다. 본 연구에서는 국내의 웨스팅하우스형 3-Loop 발전소에 대해 B^{10} 의 연소거동을 모사하는 프로그램을 개발하여 B^{10} Percent를 연소도의 함수로 계산하였고 실제로 냉각재내의 B^{10} Percent를 측정하여 검증하였다. 또한 B^{10} Percent 변화에 따른 Boron Letdown Curve를 보정하여 측정값과 비교, 검증하였다. 검증결과 B^{10} 예측 프로그램의 예상값과 측정값이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 발전소에서 나타나고 있는 임계봉산농도의 설계값과 측정값 간의 일반적인 차이에 대한 원인이 규명되었고, B^{10} 연소에 의한 상대적인 흡수체의 감소는 정지여유봉소량 계산시 고려되어야 할 필요성이 있는 것으로 나타났다.

1. 서론

현재 대부분의 PWR에서는 연료의 연소에 따른 반응도 변화 및 상대적으로 느린 반응도 변화를 보상하기 위해서 수용성 봉소가 사용되고 있다. 전출력, 제어봉 완전인출, 평형제논상태에서의 임계봉산농도는 주기초에 약 1500 ppm에서 주기말의 경우에는 10 ppm 정도로 변화하게 된다. 여기에 사용되는 봉소는 자연상태의 봉소를 나타내며 중성자 흡수체인 B^{10} 이 19.8 a/o 가 함유되어 있다. 대부분의 발전소가 장주기 운전전략을 채택하게되고 이에 따른 주기초 임여 반응도의 상승에 의한 임계봉산농도의 상승은 노심내에서 B^{10} 연소의 중요성을 부각시키게 되었다. 한편 봉소를 원자로 계통내에 새로 추가하면 B^{10} 연소를 부분적으로 보상할 수도 있으나 발전소의 장주기화에 따른 봉소의 노심내 잔류시간의 증가 및 발전소의 이용률 향상으로 인한 발전소 불시정지 횟수의 감소에 따라 봉소를 추가할 필요가 많지않게 되어 B^{10} 연소가 심화되는 경향을 보이고 있다. 이는 운전중에 일반적으로 나타나는 임계봉산농도 설계값과 측정값의 차이를 심화시켜 운전의 유연성을 저해하고, 가동중지중에 상당한 반응도 상실을 초래하여 안전성에 저해요인으로 작용하게됨에 따라 B^{10} 연소 거동을 모사하여 이를 보정할 필요성이 나타나게 되었다.

B^{10} 연소거동을 모사하는 방정식은 여러 연구논문^[1,2]에서 밝혀진 바 있으며 이에 대한 계산도 이미 많이 수행되어 있으나 국내 발전소에 대해서는 아직 자세한 연구가 이루어지지 않고 있다. 이에 대해 본 연구에서는 정상운전 및 발전소 정지시에 수용성 봉소내의 B^{10} Percent를 3D ANC^[3]의 중성자속 및 발전소 계통변수에 근거하여 구하고 또한 측정값과 비교, 검증하여 일반적으로 나타나고있는 임계봉산농도 설계값과 측정값의 차이를 규명하고 이를 발전소 정지여유도 계산에 이용하는 데 그 목적을 두고 있다.

2. 본론

2.1 지배방정식

B^{10} 및 B^{11} 의 연소 거동을 묘사하는 방정식은 봉소주입 및 희석을 고려하였을 때 다음과 같이 주어진다.

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

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

여기서,

B^{10} = B^{10} concentration

ν_B = boration rate per hour

B^{11} = B^{11} concentration

ν_D = dilution rate per hour

g = disadvantage factor

A = boron concentration in Boric Acid Tank

V_R = core coolant volume

α = B^{10} percentage in natural boron

V_T = total primary coolant volume

ρ = primary coolant density

이에 대한 해는 간단히 구해질 수가 있고 이는 아래와 같다.

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

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

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

여기서 C_1 과 C_2 는 B^{10} 과 B^{11} 의 초기조건, 즉 주기초의 B^{10} 및 B^{11} 의 존재비, B_0^{10}, B_0^{11} 을 적용하여 아래와 같이 표현된다.

$$C_1 = B_0^{10} - \frac{\frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} \cdot A \cdot \alpha}{\left[(\sigma_{a1}\phi_1 + g\sigma_{a2}\phi_2) \frac{V_R}{V_T} + \frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} + \frac{\nu_D}{V_T \cdot \rho} \right]}$$

$$C_2 = B_0^{11} - \frac{\frac{\nu_B}{V_T \cdot \rho} \cdot A \cdot (1 - \alpha)}{\frac{\nu_B + \nu_D}{V_T \cdot \rho}}$$

2.2 계산방법

상기식에서 필요한 봉소 주입률, Boric Acid Tank(BAT)에서의 봉소농도 등은 발전소의 운전자료를 사용하여 계산에 반영하였으며, 중성자 속과 봉소의 흡수 단면적 등은 3D ANC에서의 계산값을 근거로 계산에 사용하였다. 이와 같은 방법으로 BOL부터 EOL 까지 B^{10} 과 B^{11} 의 농도를 10 시간 간격으로 각 연소도에 따라 구하였고 이를 통해 B^{10} Percent를 계산하였다. 이 값을 ANC 결과인 임계 봉소농도 값에 보정하여 B^{10} 연소가 고려된 Boron Letdown Curve를 만들었다. 아울러 이와 같은 계산은 그 계산량이 방대하므로 주로 발전소 운전자료를 입력으로

사용하는 B^{10} 연소 예측 프로그램을 개발하였다.

대상 발전소는 고리 3호기 8주기, 고리 4호기 9주기, 영광 1호기 9주기를 선택하였으며 우선 이들에 대한 발전소 운전자료를 수집하고, B^{10} 연소 예측 프로그램을 이용하여 연소도에 따른 B^{10} Percent 변화와 B^{10} 연소가 고려된 Boron Letdown Curve를 계산하였다. 또한 연소도별로 임계보론농도 측정치와 B^{10} 연소가 고려된 Boron Letdown Curve를 비교해 보았고, 냉각재의 B^{10} Percent를 측정한 값과 예상한 값을 비교해 보았다.

2.3 계산결과

대상 발전소에 대해 연소도에 따른 B^{10} Percent를 본 연구에서 개발한 예측 프로그램을 이용하여 계산해본 결과 그림 1, 3, 5와 같이 나타났다. 고리 3호기의 경우는 EOL 부근에서 봉소 주입이 많이되어 그 부근에서 B^{10} Percent가 급격히 증가됨이 나타났고, 고리 4호기의 경우에는 봉소 주입을 거의 하지 않아 연소도에 따라 거의 일정하게 B^{10} Percent가 감소함을 보였다. 또한 영광 1호기는 여러번의 봉소 주입이 있었으나 그 양은 MOL에서 한 번을 제외하고는 그리 크지 않았고, 이를 반영하여 B^{10} Percent가 계산되었다. 특히 영광 1호기에 대해서는 B^{10} Percent를 MOL 부근에서 두 차례에 걸쳐 냉각재를 측정하여 얻은 측정치와 예상값을 같이 비교해 보았다. 비교해본 결과 예상값보다 약 0.3 a/o 높게 나타났으나 비교적 근접하였고 MOL 부근에 있었던 봉소 주입의 영향도 잘 모사된 것으로 나타났다.

아울러 최근의 각 발전소별 B^{10} Percent 측정 결과 표 1과 같이 나타났다. 표 1과 같이 RCS내의 B^{10} 연소현상이 MOL에서 1 a/o 가량으로 다소 큼이 입증되었고 이는 장주기화와 발전소 이용률 증가에 따라 더 커질 것으로 예상된다.

연소도에 따른 B^{10} Percent를 이용하여 이를 핵설계 보고서의 임계 봉소농도 값에 보정하여 B^{10} 연소가 고려된 Boron Letdown Curve를 대상 호기에 대해 계산한 결과 그림 2, 4, 6과 같이 나타났고 측정된 임계 봉소농도 값도 같이 비교해 보았다.

고리 3호기의 경우 모든 연소도 범위에 대해 측정된 임계 봉소농도와 거의 일치하였으며 특히 MOL 이후의 봉소 주입의 영향도 잘 반영하고 있는 것으로 나타났고, 봉소 주입이 거의 없었던 고리 4호기의 경우도 BOL부터 EOL까지 거의 일치하였다. 또한 영광 1호기의 경우도 비교적 측정치와 잘 맞는 것으로 나타났다. 특히 그림 4에서 나타났듯이 고리 4호기 9주기 MOL에서는 B^{10} 연소의 영향으로 설계치와 약 80 ppm 가량 차이를 보이고 있다.

이와같이 B^{10} 연소 거동 평가 프로그램을 이용하여 B^{10} 연소 효과를 정량적으로 정확히 예측할 수 있음이 입증되었다. 따라서 이를 이용하여 현재 설계치와 측정치와의 차이를 규명하게 되어 운전의 유연성을 줄 수 있으며, 봉산농도에 관련되는 설계인자에 이를 고려하여 안전성 향상에 기여할 수 있게 되었다.

3. 결론

본 연구에서는 국내의 웨스팅하우스형 3-LOOP 발전소에 대해 B^{10} 의 연소거동을 모사하는 프로그램을 작성하여 노심추적자료와 3D ANC 의 중성자속 및 기타 발전소 계통변수에 근거하여 B^{10} 의 존재비를 연소도의 함수로 계산하고 이에 대해 실제로 냉각재내의 B^{10} Percent를 측정하여 이를 검증하였다. B^{10} 의 연소는 주기계획이 장주기화하고 이용률이 높아짐에따라 진행정도가 심화되고 이에 따라 주기중(MOL)에는 약 1 a/o 까지 감소하는 것으로 측정결과 나타났으며 B^{10} 예측 프로그램과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 계산된 B^{10} 함량을 근거로 핵설계보고서의 값을 보정한 결과 측정된 임계봉산농도와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 발전소에서 나타나고있는 임계봉산농도 설계값과 측정값의 일반적인 차이에 대한 원인이 규명되었다. 이러한 B^{10} 의 연소 거동은 봉소농도와 그 연소정도에 따라 주기중(MOL)에 임계봉산농도에 가장 큰 영향을 미치며 이같은 B^{10} 연소에 의한 상대적인 흡수체의 감소는 정지여유봉소량 계산시에 고려되

어야 할 필요성이 있는 것으로 나타났다.

REFERENCES

1. "Evaluation of Boron-10 Depletion During Pressurized Water Reactor Operation," N. Asai et. al., Amercian Nuclear Society, August, 1983
2. "Predicting ^{10}B Depletion in Soluble Boron of LWR Coolant Systems." R.W. Brock, R. D Kliewer(B&W), Amercian Nuclear Society, Volume 71, 1994
3. WCAP-10956-P-A, "ANC : A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code," Y.S. Liu et al., December, 1985

표 1. 측정된 B^{10} 농도 결과

Sample	BOL	MOL
K1C15	19.69 ± 0.04	-
K2C12	19.82 ± 0.02	-
K3C10	19.65 ± 0.02	18.65 at 8078 BU
K4C10	19.71 ± 0.02	-
Y1C9	-	18.94 at 6214 BU 18.80 at 9740 BU
Y2C9	19.70 ± 0.02	-

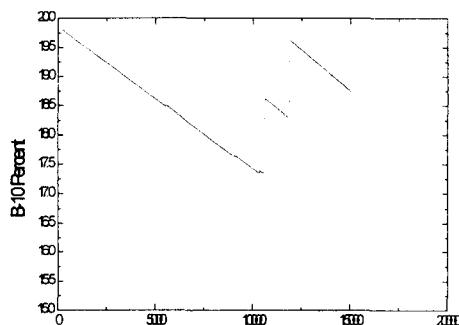


그림 1. 연소도에 따른 B^{10} Percent 변화
(K3C8)

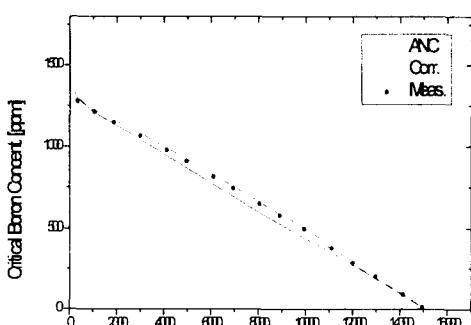


그림 2. 연소도에 따른 임계 봉소농도 비교
(K3C8)

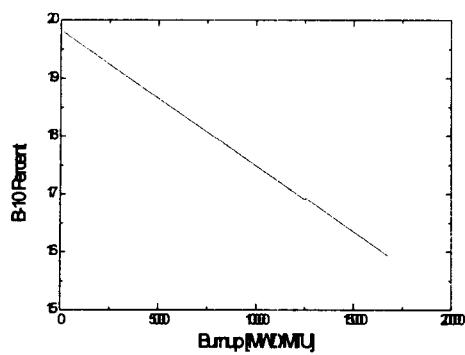


그림 3. 연소도에 따른 B^{10} Percent 변화
(K4C9)

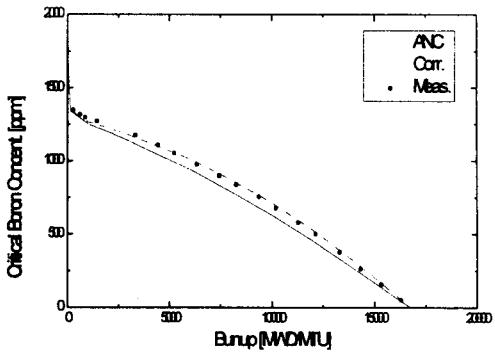


그림 4. 연소도에 따른 임계 봉소농도 비교
(K4C9)

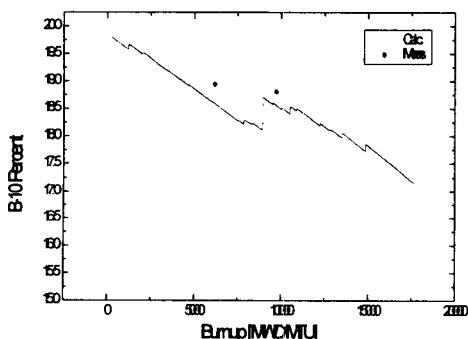


그림 5. 연소도에 따른 B^{10} Percent 변화
(Y1C9)

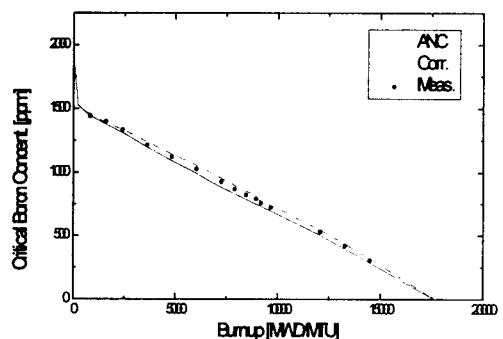


그림 6. 연소도에 따른 임계 봉소농도 비교
(Y1C9)