

노외계측기 반응을 계산을 위한 Weighting Function 민감도 분석

이덕중, 김윤희, 김용배, 이상희
전력연구원

하창주
한국원전연료(주)

요약

영광 2호기 9주기 노심을 대상으로 다양한 운전조건에서 노외계측기 weighting function을 계산하고 영향 인자들에 대한 민감도 분석을 수행하였다. Weighting function 계산은 2차원 각분할 수송코드인 DORT 2.8.14를 사용하였고 핵단면적 라이브러리는 ENDF/B-VI에 근거한 BUGLE93 라이브러리를 사용하였다. Weighting function은 축방향 weighting function(R-Z 모델)과 집합체별 weighting function(R- θ 모델)을 계산하였고, 민감도 분석에 사용한 인자는 출력준위, 연소도, 제어봉 삽입, 붕소농도이다. 민감도 분석결과 노외계측기 weighting function은 출력 준위에 민감하고 그외 모든 인자의 영향은 무시할 수 있을 만큼 작았다. 또한 출력분포와 weighting function으로부터 계산되는 단순노외계측기 교정법의 계측기반응상수는 출력준위와 연소도를 고려하여 생산해야함을 확인하였다.

1. 서론

최근 노외계측기 교정방법을 개선하려는 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있으며[1], 특히 국내에서도 그 연구가 진행되고 있다[2]. 다양한 노심상태를 예측하는데 적용되는 단순노외계측기 교정법의 정확성은 계측기반응상수에 의존하며, 계측기반응상수는 노외계측기 weighting function으로 계산된다. 따라서 현재 사용중인 노외계측기 교정방법의 4회 flux map을 1회로 줄이는 대신 노외계측기 weighting function을 계산하여 노외계측기 교정상수를 생산하고자 한다면 무엇보다도 weighting function에 대한 민감도 분석이 선행되어야 한다.

Weighting function은 adjoint flux 계산을 통하여 구하여지고, adjoint flux 계산은 여러 가지 운전조건 변화에 의해 영향 받는다. 그 주요 영향 인자는 출력준위, 연소도, 제어봉삽입, 붕소농도 등이다. Weighting function 생산은 코드입력 작성에 상당한 작업량을 요구하므로 매 교정마다 교정당시 운전조건을 반영한 weighting function을 생산하는 것 보다는 각 인자의 민감도 분석을 통하여 민감도가 큰 인자가 변할 때마다 weighting function을 생산하여 노외계측기 교정에 사용하는 것이 타당할 것이다. 본 논문에서는 축방향 weighting function과 집합체별 weighting function으로 나누어 각 인자에 대한 민감도 분석을 수행하고 이를 바탕으로 계측기반응상수 민감도 분석을 수행하였다. Adjoint flux계산은 2차원 각분할 중성자 수송코드인 DORT2.8.14[3]를 사용하였고, 핵단면적 라이브러리는 BUGLE93 라이브러리[4]를 사용하였다. BUGLE93 라이브러리는 중성자 47그룹, γ -ray 20그룹 총 67그룹 라이브러리이다. R-Z 모델 계산은 R방향 190 mesh, Z방향 232 mesh로 수행하였고, R- θ 모델 계산은 R방향 183 mesh, θ 방향 181mesh를 사용하였다. 표 1은

영광 2호기 노심 자료이고, 표 2는 핵단면적 생산에 사용된 수밀도이다.

2. 노외계측기 Weighting function

계측기의 반응률 R_d 는 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_d = \int_V d\mathbf{r} Q(\mathbf{r}) \omega_d(\mathbf{r}),$$

여기서

$$\begin{aligned} Q(\mathbf{r}) &= \text{위치 } \mathbf{r} \text{에서의 출력} \\ \omega_d(\mathbf{r}) &= \text{위치 } \mathbf{r} \text{에서의 노외계측기 weighting function} \\ V &= \text{노심 체적} \\ d &= \text{T/B (상/하부 계측기)}. \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 $\omega_d(\mathbf{r})$ 는 adjoint flux를 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_d(\mathbf{r}) = \frac{\int \chi(E) \phi_d^+(\mathbf{r}, \Omega, E) d\Omega dE}{\int_V d\mathbf{r} \int \chi(E) \phi_d^+(\mathbf{r}, \Omega, E) d\Omega dE}$$

$$\phi_d^+ = \text{계측기 } d \text{에 대한 위치 } \mathbf{r} \text{에서의 adjoint flux}$$

측방향으로 24개 노드로 나누었을 때, 각 노드의 노외계측기 weighting function은 아래와 같이 표시된다.

$$\omega_{d,k} = \frac{\int_{V_k} d\mathbf{r} \int \chi(E) \phi_d^+(\mathbf{r}, \Omega, E) d\Omega dE}{\sum_{d=T,B} \int_V d\mathbf{r} \int \chi(E) \phi_d^+(\mathbf{r}, \Omega, E) d\Omega dE} \left| \frac{V_k}{V} \right.$$

여기서

$$k = \text{측방향 노드 번호}(1..24).$$

집합체별 weighting function은 아래 식(4)로 정의 된다.

$$\omega_j = \frac{\int_{V_j} d\mathbf{r} \int \chi(E) \phi_d^+(\mathbf{r}, \Omega, E) d\Omega dE}{\int_V d\mathbf{r} \int \chi(E) \phi_d^+(\mathbf{r}, \Omega, E) d\Omega dE}$$

여기서

$$j = \text{집합체 번호}$$

단순 노외계측기 교정법[2]에서 사용하는 계측기 반응상수 R_{id} 는 아래 식(5)과 같이 정의되고, 그 의미는 i (T/B, 상/하부 노심)출력이 d (T/B, 상/하부 노외계측기)의 반응률에 미치는 영향의 정도이다.

$$R_{id} = \frac{\sum_{k \in i} P_k \omega_{d,k}}{\sum_{k \in i} P_k}$$

여기서

$$\begin{aligned} i &= \text{T/B (상/하부 노심)} \\ k &= \text{노드 번호} \\ d &= \text{T/B (상/하부 노외계측기)} \end{aligned} \quad (5)$$

위 식으로 정의된 계측기 반응 상수는 상/하부 노심출력을 알고 이로부터 노외계측기의 반응률을 계산할 때 사용된다. 정의로부터 알 수 있듯이 출력분포 또는 weighting function이 변화하면 계측기반응상수도 변하므로 민감도 분석이 필요하다.

3. 민감도 분석

민감도 분석은 축방향 및 집합체별 weighting function, 그리고 계측기 반응상수에 대하여 수행하였다. 민감도 분석에 사용된 인자는 출력준위, 연소도, 붕소농도, 제어봉 삽입등이다.

3.1 축방향 weighting function

(1) 출력 준위

출력준위에 따른 축방향 출력분포와 각 출력분포에 대한 축방향 냉각수 밀도분포는 그림 1,2와 같다. 그림 1,2와 같이 출력이 상승함에 따라 노심 상부의 냉각수 밀도는 낮아지고 그에 따라 노심의부로 누설되는 중성자의 차폐효과가 낮아져서 출력이 증가함에 따라 노심상부의 weighting 은 증가하고 노심하부는 감소한다(그림 3).

(2) 연소도

연소도에 따른 축방향 출력분포와 냉각수 밀도분포는 그림 4,5와 같다. Weighting function의 연소도에 대한 민감도 분석을 위해서 고려해야할 것은 연소에 따른 핵종변화와 냉각수의 축방향 밀도분포 변화이다. 그림 6은 연소도에 따른 핵종변화 영향을 알아보기 위한 것으로, 축방향 냉각수 밀도분포는 고정시키고 연소도가 0MWD/MTU 인 경우, 20,000MWD/MTU인 경우, 그리고 축방향으로 상·하 1/3 부분 연소도는 0MWD/MTU, 중간 1/3 부분 연소도는 20,000MWD/MTU인 경우의 weighting function을 나타낸다. 축방향 연소도 분포변화 및 연소도 차이는 weighting function에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그림 7은 연소도에 따른 축방향 냉각수 밀도분포 변화의 영향을 알아보기 위한 것으로, 연소도는 20,000MWD/MTU으로 고정시키고 축방향 냉각수 밀도분포만 BOC, MOC의 분포로 달리 했을때 weighting function 변화이다. BOC와 MOC의 냉각수 밀도 분포변화가 적으므로 weighting function의 변화도 작게 나타났다.

(3) 제어봉 삽입

그림 8, 9는 제어봉 삽입에 따른 축방향 출력분포 변화와 축방향 냉각수 밀도분포 변화로써, 제어봉 삽입에 따른 축방향 냉각수 밀도분포 변화는 연소도 차이에 의한 변화(그림 5)보다 현저히 적어 무시하고 제어봉 삽입에 따른 핵단면적 변화만 고려하여 weighting function을 계산하였다. 그림 10은 제어봉이 ARO, D 뱅크 50% 삽입, 100% 삽입에 따른 weighting function 변화로서 D 뱅크 삽입은 weighting function 분포에 미치는 영향이 매우 작음을 알 수 있다.

(4) 붕소 농도

그림 11은 연소도 10,000MWD/MTU, 정격출력에서 붕소농도가 10ppm, 812ppm, 1764ppm로 변화함에 따른 weighting function 변화를 나타낸다. 붕소농도 차이는 weighting function 분포에 주는 영향이 매우 작음을 알 수 있다.

지금까지 살펴 본 바에 따르면 출력준위, 연소도, 제어봉 삽입, 붕소농도 중 노외계측기 축방향 weighting function에 대한 주 영향인자는 출력준위이고 그 외의 영향은 무시할 수 있을 만큼 작았다. 노외계측기가 검출하는 중성자는 1MeV이상의 고속중성자이므로 열중성자는 노외계측기 신호에 기여하지 못한다. 따라서 고속중성자속 분포에 주는 영향이 거의 없는 인자들(연소도, 제어봉, 붕소 농도)은 weighting function에도 영향을 주지 못한다. 반면 출력준위에 따라 축방향 냉각수 밀도분포가 변하고, 이는 냉각수의 중성자 누설·차폐효과를 변화시켜서, 축방향 weighting function에 민감한 영향을 주는 것이다.

3.2 집합체별 weighting function

(1) 출력 준위

노심출력 변화는 냉각수 밀도분포를 변화시킨다. 그림 12는 3가지 서로 다른 냉각수 밀도(노심 하부/중간/상부 냉각수 밀도)에 대한 집합체별 weighting function이다. 노외계측기와 가장 가까운

위치에 있는 집합체에서의 weighting 차이가 약 5.7%로 크게 변화하였다.

(2) 연소도

영광 2호기 9주기 노심은 3batch로 연료가 장전되고, 주기초 region별 평균연소도는 각각 0, 20000MWD/MTU, 33000MWD/MTU이다. 3region으로 구분하여 계산한 weighting function과 노심전체를 region 구별없이 같은 연료(Fresh fuel, Once burned fuel, 또는 Twice burned fuel)로 계산한 weighting function의 비교 결과를 그림 13에 나타내었다. 3region 으로 구분하여 계산한 결과가 좀 더 정확하다고 가정하면 노심 평균 연소도를 갖는 연료 1종류로 노심을 모델링하여도 충분하다는 것을 보여준다.

그림 14는 연소도에 따른 weighting function으로서 붕소농도는 각 연소도에 맞추어 1764, 812, 10ppm을 사용하였다. 최대 차이가 0.2% 미만으로 연소도 차이가 집합체별 weighting function에 주는 영향은 무시할 수 있을 만큼 작았다.

(3) 제어봉 삽입

그림 15는 제어봉 삽입에 의한 weighting function 변화이다. 출력 100%, 연소도 10000MWD/MTU, 붕소농도 812ppm인 노심의 ARO 경우와 D 배크를 완전히 삽입한 경우의 weighting function이 최대 0.9%차이를 보였다.

(4) 붕소 농도

그림 16은 붕소 농도 변화에 따른 weighting function 변화이다. MOC에서 붕소 농도만 1964, 812, 10ppm으로 변화시킨 결과 붕소농도 차이가 weighting function에 미치는 영향은 무시할 수 있을 만큼 작았다.

이상의 결과로부터 집합체별 weighting function에 영향을 미치는 주요인자는 출력준위 변화에 따른 냉각수 밀도분포 변화이고, 그 외 연소도, 제어봉 삽입, 붕소농도등의 영향은 무시할 수 있을 만큼 작았다.

3.3 계측기 반응상수

계측기 반응상수는 식(5) 정의에 의해 출력분포와 weighting function의 조합으로 계산되어진다. Weighting function은 출력준위에 의해서 주로 영향을 받지만, 출력분포는 그림 1, 4, 8에서 보듯이 출력준위, 연소도, 제어봉 위치에 의해 영향을 받는다. 계측기반응상수는 연소도에 따라 최대 8.8% 변화하였고(표 4), 제어봉삽입에 따라서 최대 2.4%(표 5), 출력준위 변화에 따라서는 2.8% 변화하였다(표 6). 출력준위에 따른 계측기반응상수 차이는 75% 출력과 100%출력에서의 값을 비교한 것이다. 이는 노외계측기 교정이 기동시 75% 출력에서, 정상운전중 100% 출력에서 수행되기 때문이다.

4. 결론

출력준위, 연소도, 제어봉 삽입, 붕소농도의 변화에 따른 노외계측기 weighting function의 민감도 분석을 하였다. 축방향 및 집합체별 weighting function은 출력 준위에 가장 민감하게 영향을 받고 연소도, 제어봉, 붕소농도의 영향은 무시할 수 있을 만큼 작았다. 이는 노외계측기가 열중성자보다는 주로 고속중성자에 의해 영향을 받고 누설되는 고속중성자 양은 출력준위에 따른 냉각수 밀도분포에 따라 달라지기 때문이다. 연소도 또는 제어봉 삽입은 노심내 고속중성자속 분포에 미치는 영향이 작고, 따라서 노외계측기 weighting function에 대한 민감도도 무시할 만큼 작다.

계측기반응상수는 출력준위와 연소도에 의한 영향이 크므로 교정당시 연소도와 출력준위를 고려하여 정기적으로 계측기반응상수를 생산해야 한다.

참고문헌

1. PATRIC S. LACY et al., "A Computer Model of Ex-core to In-core Flux Map Calibration," ANS Meeting Charston, March 1992.
2. 하창주 등, "단순 노외계측기 교정법," '96춘계학술발표회 논문집(I), 433 (1996).
3. W. A. RHOADES and R. L. CHILDS, "An Updated Version of the DORT One- and Two-Dimensional Neutron/Photon Transport Code," ORNL-5851, Oak Ridge National Laboratory (1982).
4. D. T. INGERSOLL et al., "Production and Testing of the VITAMIN-B6 Fine-Group and the BUGLE-93 Broad-Group Neutron/Photon Cross-Section Libraries Derived from ENDF/B-VI Nuclear Data," ORNL-6795 (Draft 4/94).
5. J. G. AHN and N. Z. CHO, "Generation of Spatial Weighting Functions for Ex-Core Detectors by Adjoint Transport Calculation," *Nucl. Technol.*, **103**, pp.114~121 (1993).
6. "PHOENIX-P User Manual", Westinghouse Electric Corporation (1994).
7. "ANC User Manual", Westinghouse Electric Corporation (1994).

표 1 영광 2호기 자료

Reactor Core	
Power(MWth)	2775
Height(cm)	365.8
Equivalent radius (cm)	152.0
Top and bottom reflector thickness (cm)	40
Fuel assemblies	
Number in core	157
Lattice in assembly	17x17
Outside dimensions (cm)	20.015
Reactor coolant	
Normal pressure (psia)	2250
Inlet temperature (°F)	556.72
Average temperature (°F)	589.70
Reactor internal and vessel	
Core baffle thickness (cm)	2.867
Core barrel inner radius/thickness (cm)	170.03/5.08
Reactor vessel inner radius/thickness (cm)	199.95/20
Excore detectors	
Number of radial locations	4
Distance from core center (cm)	281.9
Number of axial detectors per location	2
Length of detector (cm)	150
Type of detector	Uncompensated ionization chamber

표 2 영역별 수밀도
(20000MWD/MTU, 1764ppm, 4.2w/o)

Material	Element	Density (atom/cm ³)	Material	Element	Density (atom/cm ³)
Core	H	2.803-02*	Stainless steel	C	2.37-04
	¹⁰ B	8.852-06		Si	8.93-04
	O	2.735-02		Cr	1.74-02
	C	9.825-06		Mn	1.52-03
	Fe	2.958-05		Fe	5.83-02
	Cr	8.406-06		Ni	8.55-03
	Zr	4.701-03	Resin	H	3.74-02
	²³⁵ U	1.557-04		C	1.21-02
	²³⁸ U	6.300-03		O	1.92-02
	²³⁹ Pu	3.292-05		Si	1.22-02
²⁴⁰ Pu	7.807-06	Air	N	4.34-05	
			O	1.02-05	
Carbon steel	C	9.81-04	Concrete	H	1.4868-02
	Si	3.71-04		C	3.8140-03
	Cr	1.27-04		O	4.1519-02
	Mn	1.12-03		Na	3.0400-04
	Fe	8.19-02		Mg	5.8700-04
Coolant	Ni	4.44-04	Al	7.3500-04	
	H	4.717-02	Si	6.0370-03	
	¹⁰ B	1.490-05	Ca	1.1588-02	
	O	2.358-02	Fe	1.9860-04	
Detector	¹⁰ B	2.3610-06			

* 2.803x10⁻⁰²x10²⁴

표 3 출력준위에 따른 계측기 반응상수

출력준위 (%)	계측기 반응 상수			
	R _{TT}	R _{BT}	R _{TB}	R _{BB}
50	1.537	.710	.675	1.479
75	1.564	.687	.691	1.448
100	1.588	.668	.709	1.422
120	1.618	.645	.727	1.386
차이*	1.5	-2.8	2.5	-1.8

* (100x-75x)/100x x 100(%)

표 4 연소도에 따른 계측기 반응상수

연소도 (MWD/MTU)	계측기 반응 상수			
	R _{TT}	R _{BT}	R _{TB}	R _{BB}
150	1.583	.645	.707	1.407
8000	1.574	.616	.694	1.386
16870	1.547	.588	.656	1.355
차이*	2.3	8.8	7.2	3.7

* (BOC-EOC)/BOCx100(%)

표 5 제어봉 삽입에 따른 계측기 반응상수

D뱅크 삽입	계측기 반응 상수			
	R _{TT}	R _{BT}	R _{TB}	R _{BB}
ARO	1.573	.616	.694	1.386
50% RIL	1.579	.615	.703	1.385
RIL*	1.579	.612	.711	1.384
150% RIL	1.575	.608	.708	1.382
차이**	-0.4	0.6	-2.4	0.1

* 영광 2호기 9주기 출력 100%에서 160스텝

** (ARO-RIL)/AROX100(%)

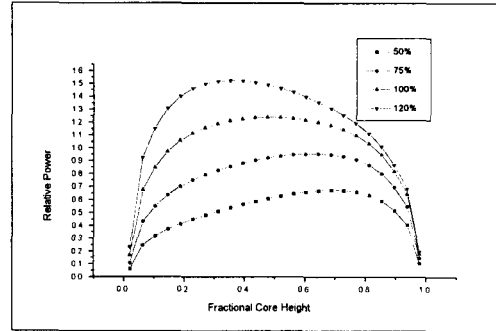


그림 1 출력준위별 축방향 출력분포

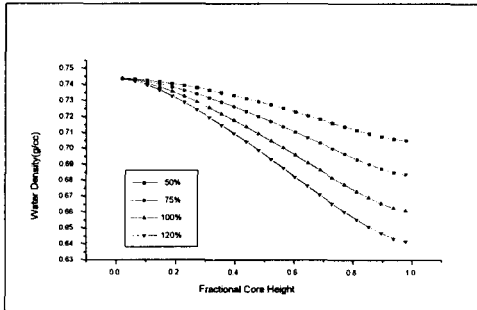


그림 2 출력준위별 축방향 냉각수 밀도분포

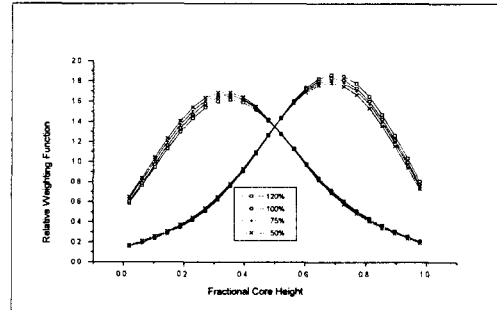


그림 3 출력준위별 정규화된 축방향 weighting function (BOC, 1764ppm)

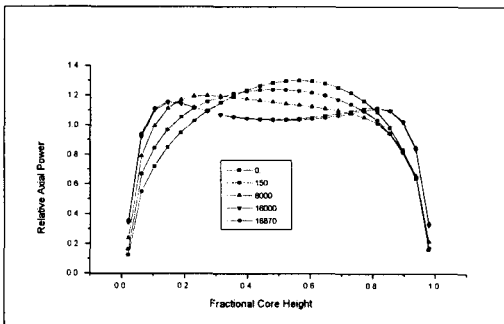


그림 4 연소도별 축방향 출력분포

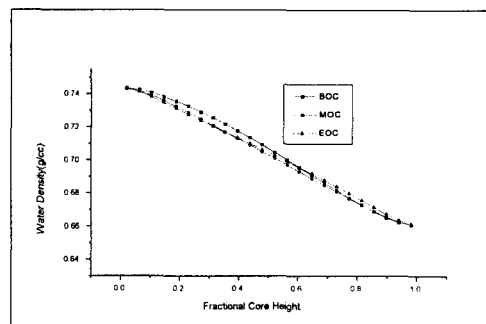


그림 5 연소도별 축방향 냉각수 밀도분포

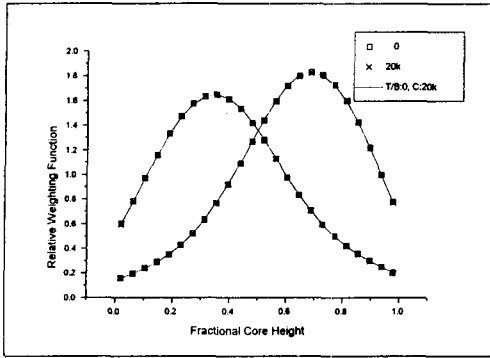


그림 6 연소도별 축방향 weighting function (100%출력, 1764ppm)

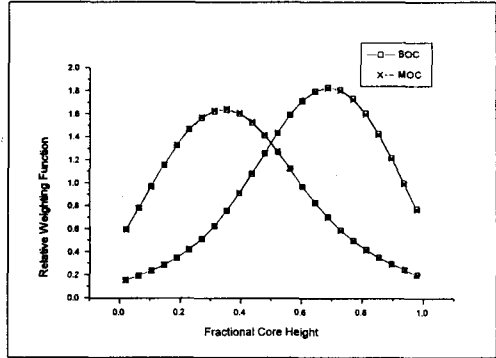


그림 7 연소도에 따른 축방향 냉각수 밀도분포 변화에 따른 weighting function

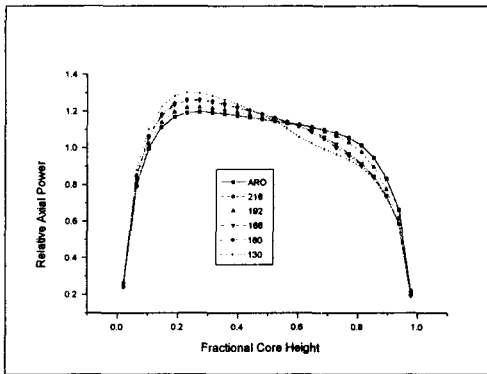


그림 8 제어봉 삽입에 따른 축방향 출력분포

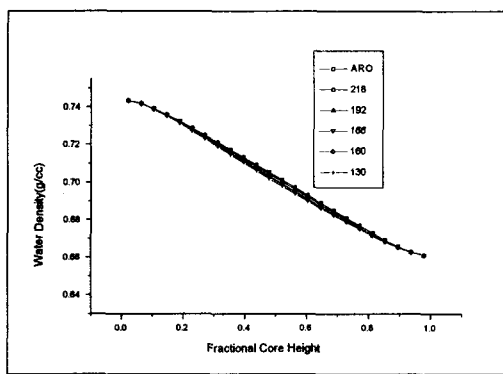


그림 9 제어봉 삽입에 따른 축방향 냉각수 밀도분포

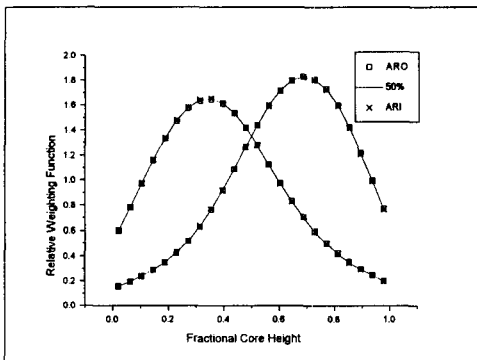


그림 10 제어봉 삽입에 따른 weighting function (10000MWD/MTU, 812ppm)

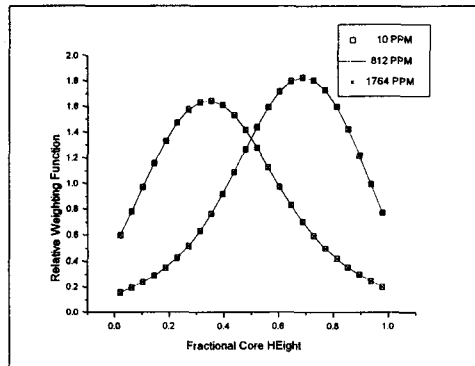


그림 11 붕소농도별 weighting function (10000MWD/MTU)

1.224	1.883			하부 중간부						
1.166	1.809									
1.101	1.728									
.118	.208	.746	3.931							
.113	.207	.758	3.930							
.108	.206	.770	3.925							
.016	.031	.125	.642	3.612						
.016	.031	.125	.658	3.708						
.015	.030	.126	.677	3.818						
-	-	.042	.128	.629	3.612					
-	-	.043	.130	.653	3.708					
-	-	.043	.134	.681	3.818					
-	-	-	.042	.128	.642	3.931				
-	-	-	.043	.130	.658	3.930				
-	-	-	.043	.134	.677	3.925				
-	-	-	-	.042	.125	.746				
-	-	-	-	.043	.125	.758				
-	-	-	-	.043	.126	.770				
-	-	-	-	-	.031	.208	1.883			
-	-	-	-	-	.031	.207	1.809			
-	-	-	-	-	.030	.206	1.728			
-	-	-	-	-	.016	.118	1.225			
-	-	-	-	-	.016	.113	1.166			
-	-	-	-	-	.015	.108	1.101			

그림 12 냉각수 밀도차에 따른 집합체별 weighting function (BOC, 1764ppm)

1.166	1.809			A B C D		3 region			
1.166	1.814					0			
1.164	1.809					20K			
1.164	1.805					33K			
.113	.207	.758	3.930						
.110	.205	.761	3.939						
.111	.207	.762	3.932						
.114	.210	.764	3.920						
.016	.031	.125	.658	3.708					
.015	.030	.124	.653	3.716					
.016	.031	.126	.657	3.710					
.017	.032	.129	.664	3.698					
-	-	.043	.130	.653	3.708				
-	-	.042	.127	.641	3.716				
-	-	.043	.129	.645	3.710				
-	-	.043	.133	.652	3.698				
-	-	-	.043	.130	.658	3.930			
-	-	-	.042	.127	.653	3.939			
-	-	-	.043	.129	.657	3.932			
-	-	-	.045	.133	.664	3.920			
FRESH	-	-	-	.043	.125	.758			
				.042	.124	.761			
				.043	.126	.762			
				.045	.129	.764			
ONCE	-	-	-	-	.031	.207	1.809		
					.030	.205	1.814		
					.031	.207	1.809		
					.032	.210	1.805		
TWICE	-	-	-	-	.016	.113	1.166		
					.015	.110	1.166		
					.016	.112	1.164		
					.017	.114	1.164		

그림 13 장전모형에 따른 집합체별 weighting function (BOC, 1764ppm)

1.166	1.809			BOC MOC EOC						
1.166	1.808									
1.166	1.807									
.113	.207	.758	3.930							
.114	.208	.759	3.927							
.114	.209	.760	3.924							
.016	.031	.125	.658	3.708						
.016	.031	.126	.660	3.705						
.016	.031	.127	.662	3.702						
-	-	.043	.130	.653	3.708					
-	-	.043	.131	.654	3.705					
-	-	.044	.132	.654	3.702					
-	-	-	.043	.130	.658	3.930				
-	-	-	.043	.131	.660	3.927				
-	-	-	.044	.132	.662	3.924				
-	-	-	-	.043	.125	.758				
-	-	-	-	.043	.126	.759				
-	-	-	-	.044	.127	.760				
-	-	-	-	-	.031	.207	1.809			
-	-	-	-	-	.031	.208	1.808			
-	-	-	-	-	.031	.209	1.807			
-	-	-	-	-	.016	.113	1.166			
-	-	-	-	-	.016	.114	1.166			
-	-	-	-	-	.016	.114	1.166			

표 14 연소도에 따른 집합체별 weighting function

1.165	1.812			ARO D bank						
1.164	1.811									
.111*	.206	.761	3.935							
.110	.206	.761	3.936							
.016	.031	.125	.655	3.712						
.016	.031	.125	.655	3.714						
-	-	.042	.128	.643	3.712					
-	-	.042	.128	.643	3.714					
-	-	-	.042	.128	.655	3.935				
-	-	-	.042	.128	.655	3.936				
-	-	-	-	.042	.125	.761				
-	-	-	-	.042	.125	.761				
-	-	-	-	-	.031	.206	1.812			
-	-	-	-	-	.031	.206	1.811			
D bank 위치	-	-	-	-	.016	.111	1.165			
					.016	.110	1.165			

그림 15 제어봉 삽입에 따른 집합체별 weighting function (100%출력, 10000MWD/MTU, 812ppm)

1.166	1.808			A B C		1764ppm			
1.166	1.808					812ppm			
1.166	1.809					10ppm			
.114	.208	.759	3.927						
.114	.208	.759	3.927						
.114	.208	.759	3.927						
.016	.031	.126	.660	3.705					
.016	.031	.126	.660	3.705					
.016	.031	.126	.660	3.705					
-	-	.043	.131	.653	3.705				
-	-	.043	.131	.654	3.705				
-	-	.043	.131	.654	3.705				
-	-	-	.043	.131	.660	3.927			
-	-	-	.043	.131	.660	3.927			
-	-	-	.043	.131	.660	3.927			
-	-	-	-	.043	.126	.759			
-	-	-	-	.043	.126	.759			
-	-	-	-	.043	.126	.759			
-	-	-	-	-	.031	.208	1.809		
-	-	-	-	-	.031	.208	1.808		
-	-	-	-	-	.031	.208	1.809		
-	-	-	-	-	.016	.114	1.166		
-	-	-	-	-	.016	.114	1.166		
-	-	-	-	-	.016	.114	1.166		

그림 16 붕소농도 차이에 따른 집합체별 weighting function (MOC)