

울진 표준형원전 시뮬레이터 노심모델 개발 및 검증

Development and Validation of the Core Model for KSNP(Korea Standard Nuclear Plant) Simulator

홍진혁

한전전력연구원

요약

본 논문은 울진 3호기 원자력발전소를 기준발전소로 하여 개발된 노심모델에 대한 등온 온도계수 (ITC), 감속재온도계수 (MTC), 연료 온도계수 (FTC), 붕소제어능, 제어봉 제어능 등 여러 노심 동특성을 제시하고 기준 발전소의 기준주기 (2주기)의 노심 동특성과 비교·분석하는 것을 주된 목적으로 하고 있다. 또한 BOL, MOL 및 EOL의 여러 출력범위에서의 원자로 정지 이후 지논 생성 및 감소를 제시하였고, BOL, MOL, EOL에서의 원자로 정지이후의 사마리움 제어값을 제시하였다. 제시된 시뮬레이터 노심 동특성은 기준 발전소의 기준 주기 핵설계 보고서의 노심 동특성과 거의 흡사한 결과를 나타내었고, 이에 개발된 울진 표준형원전 시뮬레이터 노심모델의 건전성을 입증하였다.

Abstract

The purpose of this paper is to report on the performance of the developed neutronics model of KSNP simulator including some comparisons of simulator calculated results and the plant data. This report describes the development tool (REMARK) for the neutronics model of the KSNP (Korea Standard Nuclear Plant) simulator whose reference plant is the Ulchin NPP Unit 3. And as some examples for the verification of the developed neutronics model, some figures are provided. As a result, the output of the developed neutronics model is in accord with the Nuclear Design Report (NDR) of the reference plant.

I. 서론

본 논문에서는 전력연구원에서 수행한 ‘울진 표준형원전 시뮬레이터 개발’ 과제의 일부로 울진 표준형원전 시뮬레이터의 기준발전소인 울진 3호기 운전원 훈련용 시뮬레이터에서 개발된 노심모델에 대한 등온온도계수 (ITC), 감속재온도계수 (MTC), 연료온도계수 (FTC), 붕소제어능, 제어봉 제어능 등 여러 노심 동특성을 제시하고, 기준발전소의 기준주기 (2주기)의 노심 동특성과 비교·분석하는 것을 주된 목적으로 하고 있다.

또한 BOL, MOL 및 EOL의 여러 출력범위에서의 원자로 정지 이후 지논 및 사마리움에 의한 반응도 값을 도출하여 기준발전소의 핵설계보고서와 비교하였다.

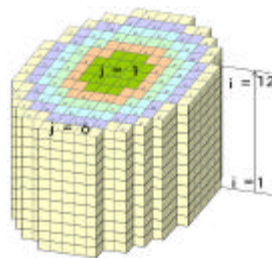
아울러, 실시간으로 구동되는 노심모델의 노심내 열중성자속, 핵연료 온도, 냉각재 온도를 3차원으로 6개의 노드별로 형상화하며, 반응도(reactivity), 출력 (Power), 노외 수직출력 경사도 (External Axial Offset), 노내 평균 핵연료/냉각재 온도, 지논/사마리움 반응도를 시간별 2차원 그래픽으로 제공하고, 각 제어봉의 현재 위치를 지시하여 노심모델이 제공하는 여러 중요 물리적 변수를 동적으로 사용자가 알 수 있게 함으로 노심 현상에 대한 이해를 높이고자 하였다. 이 3차원 형상화 틀은 그래픽의 평행이동, 축소/확대, 회전 등의 여러 옵션을 설정해 둬으로써 사용자가 사용하기에 용이하도록 편의를 도모하였다.

II. 본론

1. 노심모델 개요

노심모델개발에는 REMARK(REal Time Multigroup Advanced Kinetics) 틀이 사용되었으며, 이 모델 프로그램은 2군 3차원 노심모델 프로그램으로서 여러 연소도에서의 정상운전 상태와 비정상 운전상태를 모의할 수 있다.

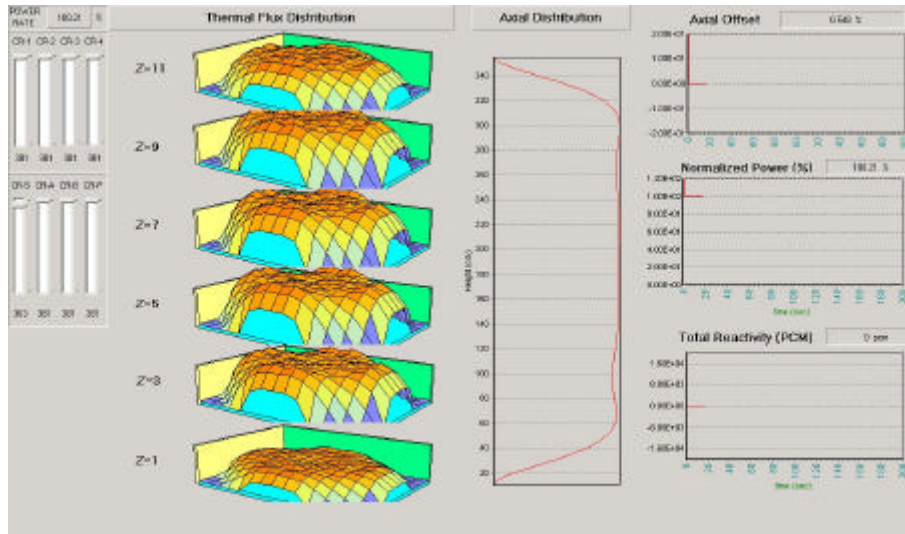
울진 표준형원전 시뮬레이터에서 개발된 노심모델은 원자로심의 연료부분을 축방향으로는 12분할하고, 반경방향으로는 177개로 분할하여 전체 2124개의 노드로 분할하여, 3차원적인 중성자속 및 출력 분포를 계산해내고 있다. (그림. 1참조)



[그림. 1] KSNP 시뮬레이터 노심모델 Nodalization

2. GUI 기반의 노심모델 3차원 형상화 틀

실시간으로 구동되는 노심모델의 노심내 열중성자속, 핵연료 온도, 냉각재 온도를 3차원으로 6개의 노드별로 형상화하며, 반응도(reactivity), 출력 (Power), 노외 수직출력 경사도 (External Axial Offset), 노내 평균 핵연료/냉각재 온도, 지논/사마리움 반응도를 시간별 2차원 그래픽으로 제공하고, 각 제어봉의 현재 위치를 지시하여 노심모델이 제공하는 여러 중요 물리적 변수를 동적으로 사용자가 알 수 있게 함으로 노심 현상에 대한 이해를 높이고자 하였다. 이 3차원 형상화 틀은 그래픽의 평행이동, 축소/확대, 회전 등의 여러 옵션을 설정해 둬으로써 사용자가 사용하기에 용이하도록 편의를 도모하였다. 노심모델 3차원 형상화 틀은 [그림. 2]에 나타내었다.

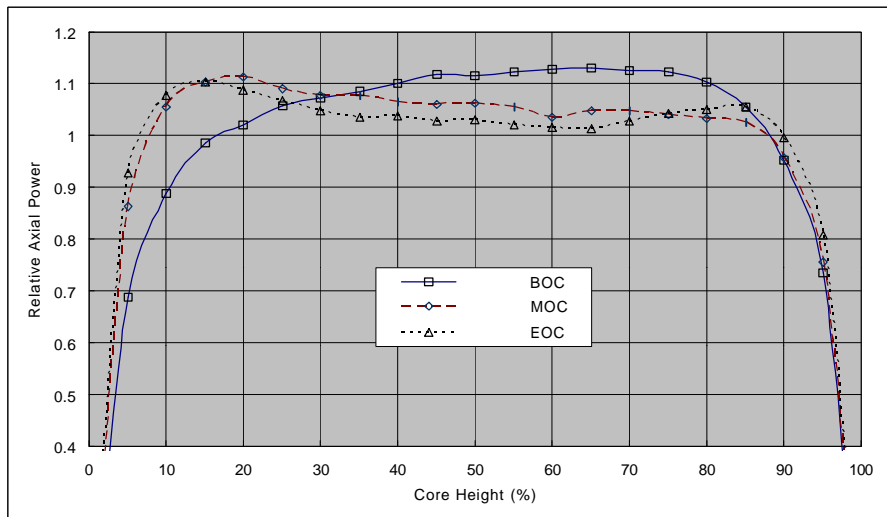


[그림. 2] 노심모델 3차원 형상화 틀

3. 노심모델 특성시험

3.1 축방향 출력분포

울진 표준형원전 시뮬레이터 노심모델의 BOL, MOL 및 EOL에서 HFP(Hot Full Power), ARO(All Rod Out), 평형 지는 조건에서 상대 축방향 출력 분포를 [그림.3]에 표시하였다. 또한 기준발전소 핵설계보고서의 축방향 출력분포와의 비교를 [표.1]에서 나타내었다.



[그림.3] 축방향 상대 출력 분포 (BOL, MOL, and EOL HFP ARO, Eq. Xe)

높이(%)	NDR			REMARK		
	BOC	MOC	EOC	BOC	MOC	EOC
0	0.00	0.00	0.00	0	0	0
5	0.69	0.86	0.92	0.6874	0.8623	0.9267
10	0.89	1.05	1.08	0.8873	1.055	1.0779
15	0.98	1.10	1.10	0.9861	1.103	1.1032
20	1.02	1.11	1.09	1.0189	1.1132	1.0878
25	1.05	1.09	1.07	1.056	1.0900	1.0674
30	1.07	1.08	1.05	1.0729	1.0778	1.046
35	1.08	1.07	1.04	1.0856	1.0776	1.0344
40	1.10	1.07	1.03	1.1009	1.0641	1.0369
45	1.11	1.06	1.03	1.118	1.0606	1.0282
50	1.12	1.06	1.03	1.1155	1.0616	1.0310
55	1.13	1.05	1.02	1.1234	1.0549	1.0198
60	1.13	1.04	1.02	1.1264	1.036	1.013
65	1.13	1.04	1.02	1.1296	1.0463	1.011
70	1.13	1.04	1.03	1.1245	1.0467	1.0262
75	1.12	1.04	1.04	1.1225	1.0393	1.0430
80	1.11	1.04	1.05	1.1016	1.031	1.0496
85	1.06	1.02	1.05	1.0539	1.0249	1.0560
90	0.96	0.95	1.00	0.9525	0.9562	0.994
95	0.73	0.75	0.81	0.7349	0.7540	0.8071
100	0.00	0.00	0.00	0	0	0

[표.1] 기준발전소 NDR과 노심모델 결과 비교표 (축방향 출력분포)

3.2 반응도계수

3.2.1 개요

원자로 노심동특성은 비정상 혹은 과도상태뿐 아니라 발전소 정상 운전시 운전원의 조작으로 인한 발전소 조건 변화에 따라 반응하는 노심특성이다. 이러한 반응특성은 반응도 계수로 정량화된다. 반응도 계수는 발전소 조건 즉 출력, 감속재, 연료온도, 수용성 붕소 농도의 변화에 따른 중성자 증배량의 변화이며 각각의 반응도계수 부(-)반응도는 원자로출력 제어를 위한 요구사항들을 결정한다.

3.2.2 등온온도계수(ITC; Isothermal Temperature Coefficient)

등온온도계수(ITC)는 감속재, 핵연료 피복재 온도 및 펠렛의 단위 온도 변화에 따른 부반응도 변화로 정의된다. 이것은 감속재, 도플러 온도계수의 변화량의 합으로 표현된다. 이것은 특히 원자로 가열시 노심이 균일하게 가열될 때 등의 반응도 변화가 온도에 따라 균일하게 나타날 때 특히 유효하다.

[그림.4]는 BOL, MOL, 및 EOL 조건에서의 등온 온도계수를 나타내었다.

2.3 감속재온도계수 및 결손

감속재온도계수 (MTC)는 감속재 단위 온도 변화 당 반응도 변화량으로 정의된다. 감속재온도계수의 총합은 감속재 부반응도이다. 일반적으로 고온영출력 (Hot Zero Power) 상태의 감속재 온도를 기준온도로 하며 감속재 온도 변화는 감속재 밀도 변화와 함께 고려되어 진다. 감속재 밀도 감소는 중성자의 감속을 적게하여 부분

응도 효과를 더 크게한다. 감속재 밀도가 일정하게 유지되면서 온도가 상승할 경우 중성자 스펙트럼을 경화(hardening) 시키게되고 이에 따라 U238, Pu240 및 기타 동위원소의 공명 흡수를 증가시킨다. 경화된 중성자 스펙트럼은 U238, Pu240의 분열 대 포획(capture) 비의 감소를 가져와 이 두 가지 효과에 의해 감속재온도계수는 보다 부반응도를 갖게 된다.

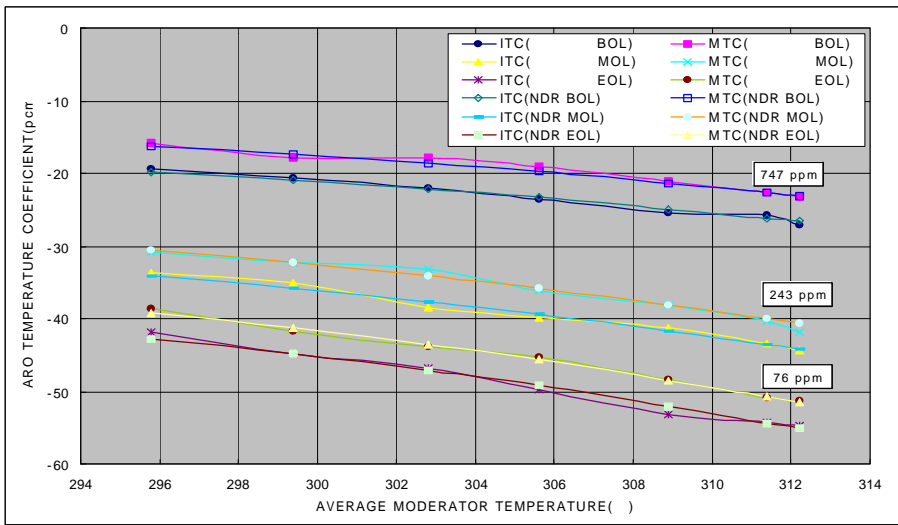
이와 함께 또한 속중성자속 대 열중성자속의 비의 증가를 가져와 노심으로부터의 중성자 누설(leak)량을 증가시켜 더욱 부반응도(more negative)를 갖게 한다. 감속재온도계수가 더 부반응도를 가지면, 온도 변화에 따라 감속재 밀도가 급격히 변화하게 되어 온도 증가에 따라 점진적으로 더 부반응도를 갖게 된다.

원자로 반응도 제어 수단으로 사용되는 수용성 붕소 또한 감속재온도계수에 영향을 주는데 감속재 온도가 상승하면 감속재 밀도가 감소하여 붕소 농도의 증가를 가져오고 감속재온도계수를 보다 양의 부반응도를 갖게 한다. 만일 수용성 붕소농도가 충분히 클 경우 감속재온도계수가 양의 값을 가질 수도 있게 되나 가연성 중성자 흡수봉이 있을 경우 붕소농도가 충분히 작은 값을 가질 수 있으므로 기술지침서를 만족시킬 수 있게된다.

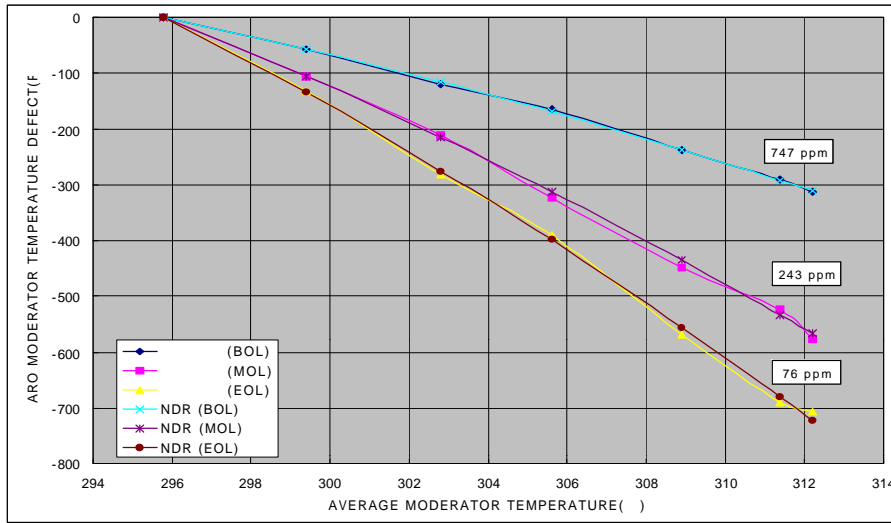
제어봉 효과는 수용성 붕소농도를 줄여서 감속재온도계수를 보다 부반응도를 갖게 한다. 제어봉 삽입은 노심으로부터 중성자 누설을 증가시켜 반경방향의 위치에 따라 감속재온도계수에 추가적으로 부반응도 효과를 주게 된다.

핵연료의 연소에 따라 수용성 붕소농도를 줄여 감속재온도계수를 보다 부반응도를 갖게 하고 플루토늄 및 분열 생성물들 또한 부반응도에 기여한다.

[그림. 4] 와 [그림. 5]에 여러 노심 조건에서의 감속재온도계수를 계산하여 나타내었다.



[그림. 4] 평균 감속재 온도에 따른 감속재 및 등온 온도 계수 (BOL, MOL 및 EOL HFP, ARO, Eq. Xe)



[그림. 5] 평균 감속재 온도에 따른 감속재온도결손 (BOL, MOL 및 EOL HFP, ARO, Eq. Xe)

3.2.4 도플러 (핵연료) 계수 및 출력결손

도플러 계수($\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$)는 핵연료 및 피복재의 온도 변화에 따른 반응도 궤환(feedback) 비율로서 핵연료 평균 온도 변화에 대한 반응도 변화이다. 도플러 온도계수의 적분이 도플러 출력결손이다. 도플러효과만의 출력계수 ($\text{pcm}/\%$ 출력)는 핵연료 평균온도 변화에 대한 출력변화 정도를 나타낸다. 도플러 출력결손은 전 출력 운전범 위(0-100%)에서의 도플러 계수의 합이다.

도플러 계수는 U^{238} 및 Pu^{240} 의 공명흡수 첨두치(peak)를 확장시키는 도플러 확장량으로 나타난다. 핵연료 온도의 증가는 핵연료의 유효(effective) 공명 흡수단면적을 증가시킨다.

노심 수명에 따른 도플러 계수의 변화는 핵연료 연소에 따른 연료 온도 감소와 Pu^{240} 생성의 합으로 나타난다. 도플러 계수는 U^{238} 및 Pu^{240} 의 공명흡수 효과뿐만 아니라 핵연료와 피복재의 열팽창 효과도 포함하며 이 열팽창 효과는 약 10%의 도플러 계수 크기 증대를 가져온다.

BOL, MOL 및 EOL에서의 도플러 계수를 [표.2]에 표시하였으며 그 값들은 출력 준위에 따른 축방향 재분포 효과를 고려하여 계산되었다.

감속재온도계수 (MTC)는 등온 온도계수에서 도플러 온도 계수를 배제시켜서 계산할 수 있다.

노심수명	BOL ($\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$)	MOL ($\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$)	EOL ($\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$)
도플러 계수	-2.16	-1.94	-1.96

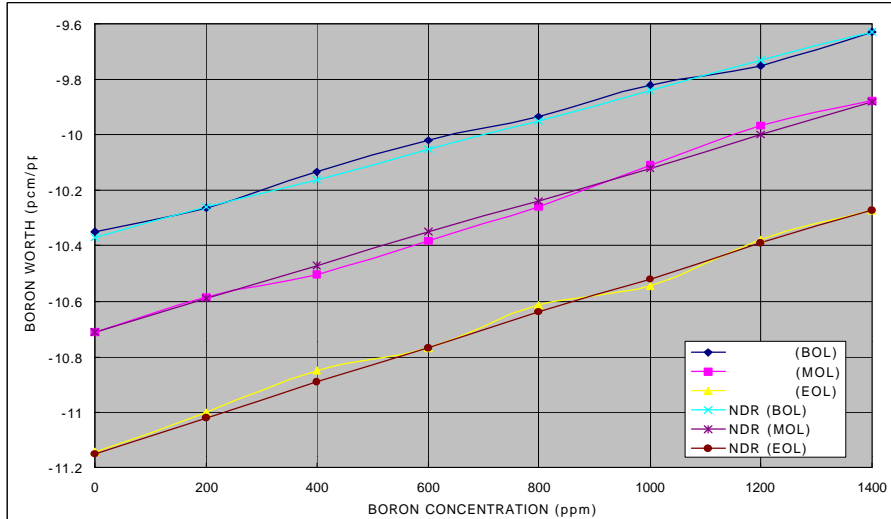
[표.2] 도플러 계수 (BOL, MOL and EOL)

3.2.5 붕소 제어값

붕소계수 (혹은 미분 붕소 제어값)는 붕소 농도 1ppm의 변화당 반응도 변화량으로 정의된다. 또한 붕소계수의 역수를 붕소제어값이라고 한다. 붕소계수는 전체 흡수율에서 붕소 흡수율의 비로서 나타낼 수 있다. 따라서, 붕소 계수의 크기는 전체 흡수율의 변화와 반비례하고, 미분 흡수율과는 정비례 관계에 있다. 붕소 계수는

열에너지대의 붕소 중성자 흡수율과 밀접한 관계가 있기 때문에 붕소 계수의 크기는 열-속 중성자율 (fast-to-thermal flux ratio)과 반비례하게 된다.

BOL 및 EOL에서의 붕소 농도의 변화에 따른 미분 붕소 제어값을 [그림. 6]에 나타내었다.



[그림. 6] 붕소 농도에 따른 미분 붕소 제어값 (at BOL and EOL)

3.3 반응도 제어

3.3.1 개요

과잉 반응도는 제어봉, 수용성 붕산, 가연성 중성자 흡수물질에 의해 제어된다. 장기간동안 일어나는 반응도 변화는 수용성 붕산 농도를 조절함으로 제어한다. 원자로 운전시 출력 및 냉각재 온도 변화에 의한 반응도 변화는 제어봉에 의해 제어한다.

3.3.2 수용성 붕산

붕산형태로 이루어진 붕소는 원자로 냉각재내의 수용성 중성자 흡수제로서의 역할을 한다.

자연상태에서의 B10 농도는 약 19.8 a/o이지만 본 보고서에서 기술된 모든 붕소 농도는 19.7 a/o으로 가정한다.

무부하 운전의 경우, 상온상압 조건 (1.03kg/cm², 20oC) 에서 운전 조건 (158.2kg/cm², 291.7oC)까지의 반응도 제어는 수용성 붕산 농도를 변경함에 의해 이루어진다. 전출력 운전에서 수용성 붕산은 지논, 사마리움, 핵분열생성물, 핵연료 감손 등에 의한 반응도 변화를 제어하게 된다.

[표.3]는 Burnup 별 예상 인계 붕소 농도를 나타내고 있다.

Cycle Burnup (EFPD)	Cycle Burnup (MWD/MTU)	CB (ppm)
0	0	749
1	50	747
14	500	702
27	1,000	664
54	2,000	594
81	3,000	521
109	4,000	449
136	5,000	379
163	6,000	313
190	7,000	243
217	8,000	163
244	9,000	76
264	9,750	10

[표.3] Burnup별 임계 붕소 농도 (HFP, ARO, Eq. Xenon)

3.3.3 제어봉

제어봉은 비교적 큰 반응도 변화에 대한 제어를 담당하게 된다. 제어봉에는 제어군(Control Banks) 및 정지군(Shutdown Banks), 부분제어군(Part-Strength Banks)으로 나누게 되는데 제어군은 전출력운전, 영출력운전 등 운전 조건 변화에 따른 반응도 변화에 대한 보상을 담당하게 되고, 정지군은 원자로 정지를 위한 반응도 제공 역할을 담당하며, 부분제어군은 Axial Power Shape 제어를 담당한다.

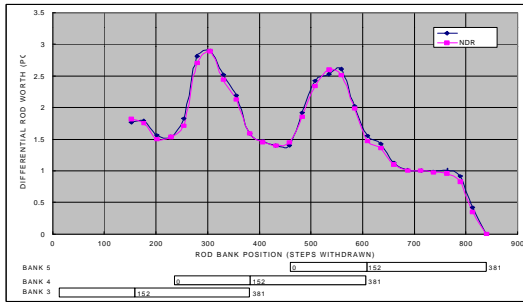
3.3.3.1 미분 제어봉 제어값 및 적분 제어봉 제어값

HFP에서의 제어군 및 정지군에 대한 적분 제어봉 제어능은 [표.4]에서 제공하고 있다.

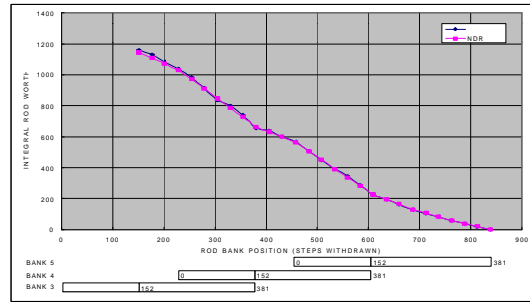
Bank	BOL, HFP		MOL, HFP		EOL, HFP	
	Eq. Xe (pcm)		Eq. Xe (pcm)		Eq. Xe (pcm)	
	Bank Worth	Cumulative Worth	Bank Worth	Cumulative Worth	Bank Worth	Cumulative Worth
5	437	437	406	406	397	397
5+4	476	913	538	944	556	953
5+4+3	512	1,425	545	1,489	555	1,508
5+4+3+2	602	2,027	613	2,102	616	2,124
5+4+3+2+1	1,635	3,662	1,735	3,837	1,764	3,888
5+4+3+2+1+B	3,875	7,537	3,800	7,626	3,763	7,651
5+4+3+2+1+B+A	9,148	16,685	9,862	17,488	10,068	17,719

[표.4] 제어봉 제어값

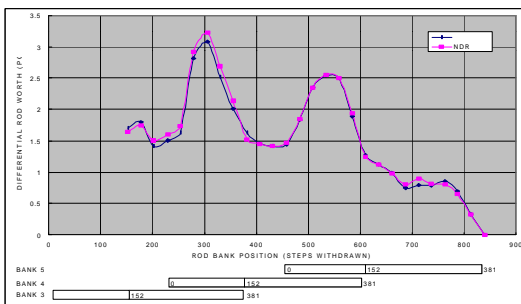
스펙트럼 경화 (Hardening), 공명 흡수율, 지는 생성, 핵분열 생성물 생성, 노심 출력 분포 변이 등의 이유로 BOL에서 EOL로의 적분 제어봉 제어값의 차이가 벌어진다.



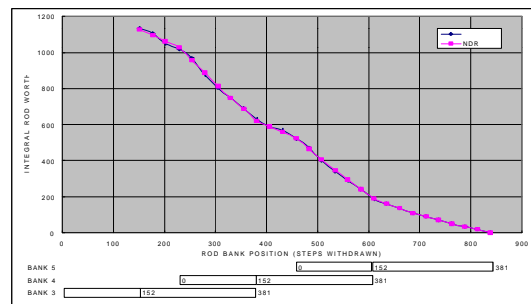
[그림. 7] 미분 제어봉값 (Banks 5, 4, 3 Moving with 152 Steps Overlap, BOL, HFP, Eq. Xenon)



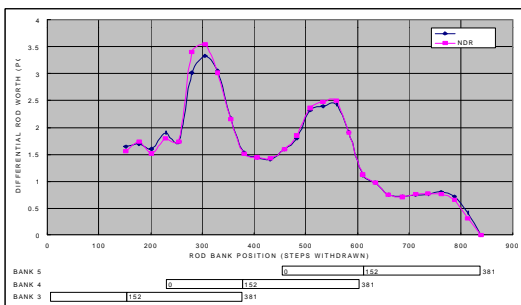
[그림. 8] 적분 제어봉값 (Banks 5, 4, 3 Moving with 152 Steps Overlap, BOL, HFP, Eq. Xenon)



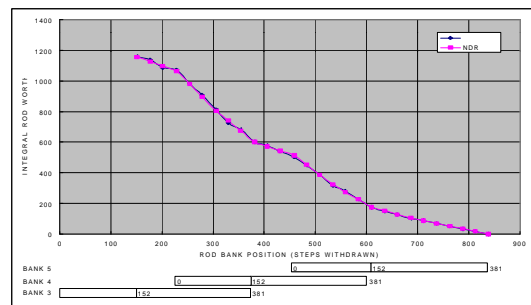
[그림. 9] 미분 제어봉값 (Banks 5, 4, 3 Moving with 152 Steps Overlap, MOL, HFP, Eq. Xenon)



[그림. 10] 적분 제어봉값 (Banks 5, 4, 3 Moving with 152 Steps Overlap, MOL, HFP, Eq. Xenon)



[그림. 11] 미분 제어봉값 (Banks 5, 4, 3 Moving with 152 Steps Overlap, EOL, HFP, Eq. Xenon)

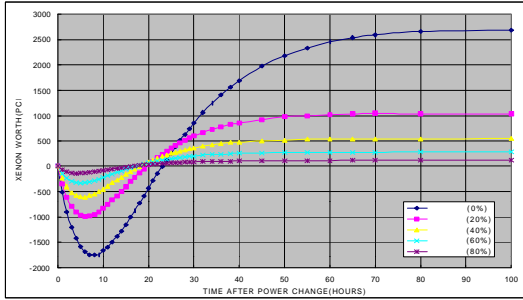


[그림. 12] 적분 제어봉값 (Banks 5, 4, 3 Moving with 152 Steps Overlap, EOL, HFP, Eq. Xenon)

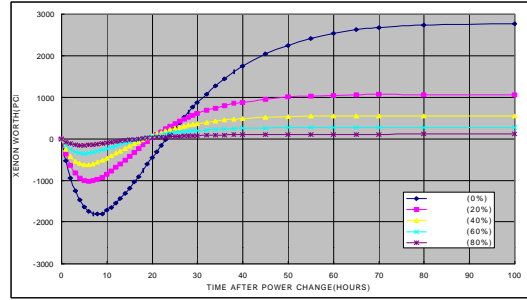
위의 [그림. 7]에서 [그림. 12]은 BOL, MOL, EOL에서의 전출력 운전(Eq. Xenon)시 제어군 5, 4, 3의 152 스텝 중첩 운전시의 미분 /적분 제어봉값을 올진 3호기 NDR과 비교하여 나타내었다.

3.3.4.2 적분 지논/사마리움 제어값

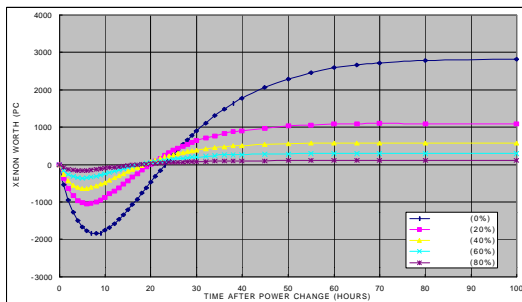
BOL, MOL, EOL의 여러 출력 범위에서의 원자로 정지 이후의 지논 생성 및 감소를 [그림.13]에서 [그림.15]에 제시하였다. 또한 BOL, MOL, EOL에서의 원자로 정지이후의 사마리움 제어값을 [그림.16]에 나타내었다.



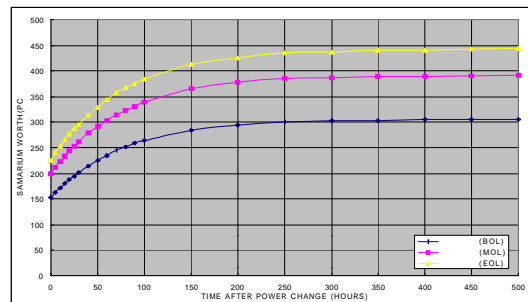
[그림. 13] 원자로 정지이후 시간별 지논 반응도 (at BOL 100% Power level)



[그림. 14] 원자로 정지이후 시간별 지논 반응도 (at MOL 100% Power level)



<그림 13.> 원자로 정지이후 시간별 지논 반응도 (at EOL 100% Power level)



<그림 14.> 원자로 정지이후의 유효 사마리움 제어값 (BOL, MOL and EOL Full Power)

위의 그림에서 알 수 있듯이 개발된 모델은 기준발전소인 울진 3호기 2주기 핵설계보고서 (NDR: Nuclear Design Report)의 결과와 일치됨을 보여준다.

III. 결론

개발된 노심모델의 건전성 평가를 위하여 등온온도계수(ITC), 감속재온도계수 (MTC), 연료온도계수 (FTC), 붕소제어능, 제어봉 제어능 등 여러 노심 동특성을 도출하여 기준발전소의 핵설계보고서의 결과치와 비교함으로써 개발된 모델이 기준발전소의 기준주기 (2주기)의 핵설계보고서의 결과와 거의 일치함을 보여주고 있다.

또한, 실시간으로 구동되는 노심모델의 노심내 열중성자속, 핵연료 온도, 냉각재 온도, 반응도, 출력 등 노심 상태를 나타내는 중요변수에 대한 현재 값을 2·3차원적으로 실시간으로 보여주는 3차원 형상화 툴을 개발함으로써 노심모델이 제공하는 여러 중요 물리적 변수를 동적으로 사용자가 알 수 있게 함으로 노심 현상에 대한 이해를 높일 것으로 기대한다.

IV. 참고문서

[1] REMARK, GSE Modeling Technical manual
 [2] The Nuclear Design Report for Ulchin Nuclear Power Plant Unit 3 Cycle 2, KNF-U3C2-99018, KEPCO Nuclear Fuel Co., LTD., July 1999.
 [3] Myeong-Soo Lee etc, The new research activities of KEPRI for KNPEC-2 Simulator upgrade project , ASTC-Advanced Simulation Technologies Conference-2001 SCS 2001.
 [4] ANSI/ANS-3.5 1998, Nuclear Power Plant Simulations for Use in Operator Training .

- [5] Yong-Kwan Lee etc, KEPCOs 3-Pack Simulator Develop Plan, Proceedings of the 1995 Simulation Multi-conference (Phoenix, AR, Apr.9-13, 1995), SCS, pp. 53-57.
- [6] Myeong-Soo Lee etc, Verification and Validation of the Yonggwang 3&4 Full Scope Simulator 12th European Simulation Multi-conference (June.16-19, 1998), SCS, pp. 246-251.
- [7] Yong-Kwan Lee etc, Performance of the NSSS Model for Design Base Plant Transients of the Yonggwang 3&4 and Kori No. 2 Simulators, 2000 Western Multi-conference (Jan.23-27, 2000), SCS.