

월성 1호기 국부과출력보호 재평가를 위한 노물리 모사

Core Physics Simulation for Wolsong Unit 1 ROP Analysis

류석진, 박동환, 김용배, 이상희, 이창섭

대전시 유성구 문지동 130-16
한국전력연구원

요 약

현재 18여년간 운전 중인 월성 1호기는 원자로 설비 노후화에 따른 국부 과출력보호 해석의 재평가에 대한 필요성이 제기되었다. 국부 과출력보호 해석의 재평가를 위해서는 핵연료 다발, 채널 출력 및 계측기 신호 생산등 열수력 및 노심의 계산이 필수적이다. 국부 과출력보호 해석을 위한 출력분포 계산은 PPV/MULTICELL/RFSP 전산체계를 사용하였으며, 본 연구에서는 현장에서 발생할 수 있는 가상 사고 즉, 원자로 정지후 재가동, Shim 운전, Stepback, 각 제어기구들의 삽입·인출등 총 926가지의 시나리오 중에서 기준출력 및 232개의 Cases에 대하여 모사하였다.

ABSTRACT

It has been issued that ROP(Regional Overpower Protection) for Wolsong Unit 1 needed to be reanalyzed due to the aging effect. Thermo-hydraulics and core simulation have to be performed for calculation of the fuel bundle power, channel power and detector signal production. PPV/MULTICELL/RFSP code system was used to calculate the power distribution for the ROP analysis. In this study, 232 cases out of 926 scenarios which include postulated accidents such as Startup after Short Shutdown, Shim Cases, Stepback, Insertion and Withdrawal of Reactivity Control Rods were simulated.

1. 서론

중수로형 원전은 운전중 발생하는 국부 노심출력 변동으로 인한 원자로의 과출력을 방지하기 위해 채널별 출력에 대한 운전 제한치를 설정하고 있다. 월성 1호기의 경우 계측기 노후화로 인해 운전 신뢰성의 저하를 초래하고 있을 뿐만 아니라 트립 설정치 분석을 매번 외국 기술에 의존함으로써 막대한 비용이 소요되고 있다. 월성 1호기는 노후화(Aging Effect) - 압력관 부풀림(Creep), 압력관 두께 감소, 증기발생기의 열전달율 감소, Orifice 직경 변경, 압력관이나 파이프의 표면 거칠기 변화 등 - 에 따른 트립설정치 재평가가 필요하다. 노후화는 1차측 열수력 계통의 열수력적 특성을 변화시키는 주요 원인이 되는데, 특히 임계채널출력을 낮추는 경향을 보이므로 ROP 관점에서 매우 중요

하다. 더구나 지난 1995년도에 핵계측기를 전량 교체하면서 계산한 ROP 트립설정치는 교체 당시 월성 1호기 열수력적 특성을 반영하지 않은 상태에서 얻어졌다는 사실 때문에 노후화로 인한 트립설정치 감소는 재평가가 필요한 실정이다. 핵연료 다발출력이나 계측기 신호의 경우 기존의 계산값(TTR-289)[1]을 사용하여도 충분한 신뢰성이 있으나, 국내 기술력 확보 및 차후 CANFLEX 핵연료 실용화에 따른 트립설정치의 계산을 위해서도 충분한 가치가 있다. 이러한 목적으로 본 연구에서는 현장에서 발생할 수 있는 여러 가지 국부과출력 현상을 소개하고, 핵설계 코드인 RFSP[2][3]를 이용하여 기준출력 및 설계기준 사고인 232개의 경우에 대하여 핵연료 다발출력분포 및 채널출력 계산을 수행하였다. 따라서 각 시나리오에서 수행된 연구내용결과를 분석하여 최대한의 운전 여유도를 확보하고 불필요한 원자로 정지를 방지하고자 한다.

2. ROP 시나리오 전산체계 및 Reference Case 노심 모사

중수로 노심모사 모사를 위해서는 현재 AECL에서 개발한 PPV/MULTICELL/RFSP[4] 코드체계를 이용한다. PPV(POWDERPUFS-V)코드는 실험식에 근거한 중수로용 천연우라늄 핵연료 격자상수 계산을 위한 코드이며, 현재 RFSP 코드내에 하나의 모듈로 내장되어있다. 또한 반응도 제어기구와 구조물의 증분단면적 생산을 위해 3차원 확산방정식을 이용하는 MULTICELL 코드를 사용하며, 3차원 노심계산을 위해 확산방정식을 근거로 하는 RFSP 코드를 이용한다. 월성 1호기 ROPT 시나리오 분석을 위하여 RFSP 코드로 모사해야 하는 시나리오는 표 1, 핵연료 다발의 격자상수 생산을 위한 운전조건은 표 2와 같으며 각 시나리오별로 약 5-20여개의 Case들이 있다. 트립설정치 계산을 위해 가장 기준이 되는 Reference Case는 월성 1호기 원자로 운전의 기준 모델로서 현장운전 이력에 근거하여 평균 경수준위를 40%로 고정하고 시간-평균모델을 수행하였을 때, 임계도가 1.00400으로 RFSP 코드 계산값이 0.00400만큼 bias되어 있다. 따라서 Reference Case 1의 Target keff를 1.004로 하였으며, Reference Case 1의 계산결과로서 채널별 출력, 방출조사도, phi-nom 등이 현장 노심 관리원에게 제공되어 교체연료 선정의 근거 자료로 사용된다. Reference Case 1은 표 3에 주어진 Zone별 출력분포를 기준으로 하여 모델링 되는데 그림 1에서와 같이 구별된 영역으로 RFSP 모델상 1번 Zone이 low x, low y, low z 방향이고 A-side에 해당된다. Target Zone별 출력분포를 맞추는 방법은 TIMEAVER 모듈에 입력되는 방출조사도를 조정하며 그림 2와 같이 구분한 방출조사도 영역별로 입력한다. Zone별 출력분포는 RFSP 코드의 TA 모델 계산결과이고 방출조사도 분포는 RFSP 코드의 입력으로 사용자에게 의해 입력된다. 따라서 Target Zone 별 출력분포를 얻기 위해서 Trial-and-Error 방법으로 여러 번 반복계산을 수행하여야 한다. 마찬가지로 keff 도 RFSP 코드의 계산결과로 주어지고 영역별 방출조사도 입력값에 따라 변화한다. 즉, 방출조사도를 원자로 전체적으로 높이거나 낮춤으로써 keff를 낮추거나 높일 수 있는데 대략 반응도 1 mK 당 방출조사도 0.029 n/kb에 해당하였다. 따라서 Reference Case를 생산하는 과정은 영역별 방출조사도를 조정하여 Target Zone 별 출력분포와 Target keff를 맞추는 반복계산으로 이루어진다. 이러한 과정을 거쳐 얻어진 Target Zone별 출력분포 및 Target keff를 만족시키는 방출조사도 분포와 Zone별 출력분포를 표 3에 나타내었다. Reference case의 결과값을 이용하여 Fuel Heat Rating과 유효 중성자속에 대한 최대 중성자속의 비를 수정하여 격자상수를 재 생산한다. 이에 재계산된 값은 다음과 같다.

$$\text{Fuel Heat Rating} = 16.317 \text{ kW/cm}$$

$$\text{유효 중성자속에 대한 최대 중성자속 비} = 0.7532$$

이후 RFSP 코드 재계산을 수행하여 14개 Zone Controller 위치에서의 중성자속 분포를 출력하고 TIMEAVER 모듈에 입력하여 DAF 파일로 저장한다. 이상으로 TA모델 Reference Case 1 생

산이 완료되었고 이 후의 모든 계산은 Reference Case 1 DAF 파일을 기초로 하여 수행된다.

3. ROP 설계기준 사고 시나리오 노심 모사

본 연구에서는 핵설계코드인 RFSP 코드를 이용하여 현장에서 발생 할 수 있는 총 926가지의 시나리오 중에서 기준출력 및 232개에 대하여 출력분포 및 노내 계측기 신호를 생산하였으며, 각 시나리오별 결과를 표 4에 나타내었다.

3.1 Steady State Cases with and without Spatial Control

이는 Reference Case 1 DAF 파일을 읽어들이 경수영역제어기의 평균 경수준위를 각 case에 맞게 입력하여 TIMEAVER 모듈을 수행함으로써 생산한다. Reactivity Control을 위하여 두 가지 Option이 제공되는데 Spatial Control과 Bulk Control이다. Bulk Control은 Target keff를 만족시키기 위하여 경수영역제어기 14개의 경수 레벨을 전체적으로 올리거나 내리는 것을 의미한다. Spatial Control은 Target Flux Shape을 만족시키기 위하여 14개 경수영역제어기의 경수레벨을 각각 조절하는 것을 의미한다. CANDU원자로는 기동 과정에서 일단 임계에 도달한 이후에는 계속해서 Bulk Control이 작동하고 원자로 출력이 15% 이상이 되면 Spatial Control이 작동한다. 이 시나리오에는 Bulk Control과 Spatial Control이 모두 작동하는 경우와 작동하지 않는 경우를 포함한다.

3.2 Zone Drained from 20%, 40%, and 80%

14개 경수영역제어기 중에서 어느 하나가 반응도 조절기능을 상실하고 경수가 모두 빠지는 경우를 묘사하는 시나리오이다. 이 시나리오는 총 42 case로 평균경수 준위가 20%, 40%, 80%인 상태에서 출발하여 14개 경수영역제어기가 각각 경수를 상실하는 경우를 포함한다.

3.3 Single Adjuster Withdrawn with Spatial Control

21개 각각의 Adjuster Rod가 각각 완전 인출된 경우와 절반 인출된 경우를 모델링하는 시나리오이다. 이 시나리오의 주의할 사항은 Adjuster가 절반 인출될 경우, 원자로 중심부까지만 인출해야하므로 그림 3에서 보는 바와 같이 각 Adjuster 마다 인출길이가 달라진다. 또한 Adjuster를 인출하는 경우에 Lead Cable까지 인출하도록 모사해야 한다. Adjuster Rod 1, 7, 8, 14, 15, 21 번은 원자로 내 중심부에서 벗어난 위치에 설치되어 있어 정상운전중의 완전 삽입 깊이가 원자로 상부로부터 440cm 이고 원자로 중심부 위치는 382.85cm이므로 절반 인출시 57.15cm만큼 인출해야 한다. 그 외 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 20 번 Adjuster Rod는 완전 삽입 깊이가 554.3cm이므로 절반 인출시 171.45cm를 인출해야 한다.

3.4 MCA cases

MCA(Mechanical Control Absorber)란 SOR(Shutoff Rod)와 동일한 사양으로 제작되어 급격한 출력 감발시 사용되는 반응도 제어장치를 칭하고 원자로 내에 4개의 봉이 대칭으로 설치되어 있다. MCA는 강한 흡수체이므로 MCA Cases를 모사하기 위해서는 기준모델인 Reference Case의 Mesh를 변경시켜주어야 한다. 이에 Mesh를 36×24×28로 재조정하여 MCA의 삽입상태를 모사하였다.

3.5 Zone Induced Tilt

Zone Induced Tilt란 경수영역제어기의 경수 준위가 정상운전준위에서 벗어나 출력편차를 유발하는 경우이고 이를 모사하기 위하여 경수준위를 RFSP 입력에서 인위적으로 변경한다. 경수준

위의 변경으로 Axial, Azimuthal, Radial Tilt 등을 유발시킨다.

3.6 Harmonic Tilts

Reference Case의 정상상태 Xenon을 변경시켜 천이상태를 유발하는 시나리오이다. 우선 Reference Case의 DAF 파일에서 4560개 번들의 Xenon을 추출하고 이를 Top/Bottom Tilt인 경우는 그림 2와 같이 변화시키고, Side/Side Tilt의 경우는 그림 3과 같이 변화시켜서 다시 DAF 파일에 입력한다. Xenon 분포가 변화된 DAF 파일을 읽어서 Xenon Transient Option을 사용하여 Harmonic Tilt 시나리오를 생산한다. 그림 4와 그림 5에서 -5(-10, +5, +10)는 Xenon 양을 -5%(-10%, +5%, +10%) 만큼 변화시킴을 의미한다.

3.7 Startup After Short Shutdown

원자로 정지 후 30분 이내에 재기동이 가능함을 확인하기 위한 Case로서 출력 감발후 Xenon이 충분히 생성되기 전 즉 30분 이내에 재기동 하게 되는 시나리오를 묘사한다. 원자로가 30분 내에 재기동을 실패하면 35시간 동안 Xenon이 사라질 때까지 기다린 후 재기동하게 되고 이는 Startup After Poisonout 시나리오가 된다. 재기동 과정을 그림 6에 나타내었다. 원자로 출력이 100%에서 0%로 변화하면 Xenon이 생성되기 시작하고 그에 따라서 경수영역제어기 경수 수위가 떨어지기 시작하여 30분 정도 경과하면 경수 수위 20%에 도달한다. RFSP 계산에서는 Xenon Transient Option을 주고 경수 수위가 20%가 될 때까지 경과시간을 찾는 과정을 거치는데 이것을 모델링하는 것이 Case 150번이다. 이때 이미 Adjuster 들은 모두 인출되어 있다. 따라서 Case 151번에서 출력을 56%까지 상승시킨다. 출력 56%로 유지하면 Xenon이 소멸되기 시작하고 이에 따라 경수 준위가 상승하게 된다. 경수 준위가 70%에 도달하면 Adjuster Bank 7을 삽입하고 출력을 65%로 상승시킨다. 이것이 Case 152이고 경수준위는 감소한다. 출력을 65%로 유지하면 경수 준위가 다시 70%로 상승하게 되는데 이것이 Case 153이다. 같은 절차를 거쳐 Case 154-167을 모델링 한다.

3.8 Stepback to 60% FP

원자로 출력을 순간적으로 감발 시키는 것을 묘사하는 시나리오이다. 원자로를 100% 출력에서 60%로 Stepback 할 경우 경수영역제어기만으로는 부반응도 주입이 충분하지 않으므로 MCA를 동시에 사용한다. 출력이 순간적으로 감소하면 Xenon이 급격히 증가하므로 자연스럽게 MCA는 인출되고 경수영역제어기와 Adjuster를 사용하여 원자로의 반응도를 제어한다. Stepback 되기전 정상운전 상태에서는 모든 Adjuster Rod가 완전 삽입되어 있으므로 출력감발에 따른 Xenon 부하를 Adjuster Bank를 인출함으로써 감당한다. 그림 7에서 보는 바와 같이 원자로의 출력을 순간적으로 60%로 감발시키면 Xenon이 증가하고 이에 따라 경수준위가 감소하여 20% 준위에 도달하면 Adjuster Bank 1을 인출하여 경수준위가 상승되도록 한다. Xenon은 계속해서 증가하여 경수준위는 20%로 다시 감소하고, 그러면 Adjuster Bank 2를 인출한다. 이 과정을 반복하여 Adjuster Bank 4까지 인출하면 Xenon의 증가가 둔화되고 최대치를 지나 서서히 감소하게 된다. Xenon 감소에 따라 경수준위가 70%에 도달하면 Adjuster Bank 4를 삽입한다.

3.9 SHIM Cases

SHIM 운전이란 Refueling Machine 고장 등의 이유로 Daily Refueling이 불가능한 경우라도 경제성을 위하여 원자로를 정지시키지 않고 Adjuster를 인출함으로써 반응도를 주입하여 일정기간 동안 운전을 계속하는 것을 의미한다. 그러나 SHIM 운전중에는 Adjuster를 인출함에 따라서 원자로 출력을 단계적으로 낮추어야 한다. 이는 Adjuster의 주 역할이 운전중인 원자로의 출력이 감발될 경우 생성되는 Xenon 부하를 감당하는 것이기 때문으로 Adjuster Bank를 인출하는 만큼 Xenon부하 감당능력이 저하되어 Xenon 부하를 낮추기 위하여 출력을 감소시키는 것이다. 연료교체 없이 운전을 계속하면 연소가 진행됨에 따라 반응도가 감소가 감소하고 이는 경수준위의 감소로 나타난다. 그림 8에서 보

는 바와 같이 경수준위가 20%로 감소하면 원자로 출력을 94%로 내리고 Adjuster Bank 1을 인출한다. 일시적으로 경수준위가 상승하지만 연소가 진행되면 다시 경수 준위는 20%로 떨어지게 되고 이에 따라 출력을 87%로 낮추고 Adjuster Bank 2를 인출한다. 이 과정을 Adjuster가 모두 인출되고 출력이 52%가 될 때까지 반복한다.

4. 결론

중수로 원전 설계사인 캐나다 AECL사와 공동연구협정을 체결하고 현장에서 사용중인 최신 버전을 입수하여 핵설계코드인 RFSP 코드를 이용하여 기준출력 및 232여개의 Cases별 출력분포 및 검출기 반응도 계산을 수행하였다. 향후 HSP-2, 3에 해당하는 700여개의 계산을 수행하고 TTR-289에서 수행한 결과를 비교 분석 하고자 한다.

참고 문헌

1. F.A.R. Laratta, G.K.J. Gomes and C.M. Bailey, "Design and Assessment of the Replacement ROPT Systems for Wolsong-1", AECL Report, TTR-289 Part 1 (W1), 1995
2. D.A. Jenkins and A.C. Mao, "RFSP User's Manual", AECL Report, COG-93-104, 1996
3. A.R. Dustur and D.B. Buss, "MULTICELL - A 3-D Program of the Simulation of Reactivity Devices in CANDU Reactors", AECL Report, AECL-7544, 1983
4. B. Rouben, "Overview of Current RFSP-Code Capabilities for CANDU Core Analysis", AECL Report, AECL-11402, 1996

표 1 ROP 시나리오

Description	Case #
• Reference Case 생산	1
• Steady-State Cases with and without Spatial Control	2 - 9
• Zone Drains From 20%, 40%, and 80%	10 - 51
• Zone Drains From 40% without Spatial Control	52 - 65
• Single Adjuster Withdrawn with Spatial Control	66 - 107
• MCA Cases	108 - 119
• Zone Induced Tilts	120 - 139
• Harmonic Tilts	140 - 149
• Startup After Short Shutdown	150 - 167
• Startup After Poisonout	168 - 186
• Startup After Prolonged Shutdown	187 - 190
• Stepback to 60% FP	191 - 201
• Shim Cases	202 - 221
• Adjuster Banks and MCA's Half Out	222 - 232

표 2 월성 1호기 운전조건

Item	Description	Value
1	Fuel neutron temperature(℃)	225
2	Moderator density(g/cm ³)	0
3	Moderator temperature(℃)	73.81500
4	Coolant density	0.8122441
5	Fuel density	10.6641
6	Fuel temperature	687
7	Moderator purity	99.89
8	Coolant temperature	286
9	D2O coolant purity	99.11
10	Total fission power (MW)	2156

표 3 Reference Case 생산

Zone 영역	Calculation	Target zone 출력	방출조사도 영역	Exit. Irrad. (n/kb)
Zone 03-10	173.54	173.8	TOP	1.686
Zone 01-08	133.48	133.5	OUTER TOP	1.693
Zone 06-13	133.32	133.5	MIDDLE	1.895
Zone 04-11	153.34	153.3	INNER	1.890
Zone 02-09	133.27	133.0	OUTER BOT	1.655
Zone 07-14	133.01	133.0	RIGHT	1.645
Zone 05-12	170.74	170.6	BOTT1	1.627
			BOTT2	1.474
			BOTT3	1.190

표 4 각 시나리오별 계산 결과

STEADY STATE CASES WITH OR WITHOUT SPATIAL CONTROL								
Case	FILE NAME	Description	Zone Level	Power	S.C.	B.C.	T. Keff	READ
1	SSSC40	STEADY-STATE WITH S.C.	40.0	100	N	N	-	-
2	SSSC20	STEADY-STATE WITH S.C.	20.1	100	Y	Y	1.0054	1
3	SSSC50	STEADY-STATE WITH S.C.	49.7	100	Y	Y	1.0033	1
4	SSSC60	STEADY-STATE WITH S.C.	59.9	100	Y	Y	1.0026	1
5	SSSC80	STEADY-STATE WITH S.C.	79.9	100	Y	Y	1.00137	1
6	SSNC10	STEADY-STATE WITHOUT S.C.	10.0	100	N	N	-	1
7	SSNC20	STEADY-STATE WITHOUT S.C.	20.0	100	N	N	-	1
8	SSNC80	STEADY-STATE WITHOUT S.C.	80.0	100	N	N	-	1
9	SSNC90	STEADY-STATE WITHOUT S.C.	90.0	100	N	N	-	1

※ S.C.=Spatial Control, B.C.=Bulk Control

표 4 각 시나리오별 계산 결과 (계속)

ZONE DRAINS FROM 20%, 40%, 80%								
Case	FILE NAME	Description	Zone Level	Power	S.C.	B.C.	T. Keff	READ
10	D01C20	ZONE DRAIN 01 FROM 20%	19.7	100	Y	Y	1.0055	2
11	D02C20	ZONE DRAIN 02 FROM 20%	19.2	100	Y	Y	1.0055	2
12	D03C20	ZONE DRAIN 03 FROM 20%	19.7	100	Y	Y	1.0055	2
13	D04C20	ZONE DRAIN 04 FROM 20%	19.3	100	Y	Y	1.0055	2
14	D05C20	ZONE DRAIN 05 FROM 20%	19.2	100	Y	Y	1.0055	2
15	D06C20	ZONE DRAIN 06 FROM 20%	19.6	100	Y	Y	1.0055	2
16	D07C20	ZONE DRAIN 07 FROM 20%	19.2	100	Y	Y	1.0055	2
17	D08C20	ZONE DRAIN 08 FROM 20%	19.8	100	Y	Y	1.0055	2
18	D09C20	ZONE DRAIN 09 FROM 20%	19.2	100	Y	Y	1.0055	2
19	D10C20	ZONE DRAIN 10 FROM 20%	19.2	100	Y	Y	1.0055	2
20	D11C20	ZONE DRAIN 11 FROM 20%	19.6	100	Y	Y	1.0055	2
21	D12C20	ZONE DRAIN 12 FROM 20%	19.2	100	Y	Y	1.0055	2
22	D13C20	ZONE DRAIN 13 FROM 20%	19.7	100	Y	Y	1.0055	2
23	D14C20	ZONE DRAIN 14 FROM 20%	19.3	100	Y	Y	1.0055	2
24	D01C40	ZONE DRAIN 01 FROM 40%	38.0	100	Y	Y	1.0042	1
25	D02C40	ZONE DRAIN 02 FROM 40%	37.0	100	Y	Y	1.0042	1
26	D03C40	ZONE DRAIN 03 FROM 40%	37.1	100	Y	Y	1.0042	1
27	D04C40	ZONE DRAIN 04 FROM 40%	37.3	100	Y	Y	1.0042	1
28	D05C40	ZONE DRAIN 05 FROM 40%	36.9	100	Y	Y	1.0042	1
29	D06C40	ZONE DRAIN 06 FROM 40%	37.9	100	Y	Y	1.0042	1
30	D07C40	ZONE DRAIN 07 FROM 40%	37.0	100	Y	Y	1.0042	1
31	D08C40	ZONE DRAIN 08 FROM 40%	37.9	100	Y	Y	1.0042	1
32	D09C40	ZONE DRAIN 09 FROM 40%	37.0	100	Y	Y	1.0042	1
33	D10C40	ZONE DRAIN 10 FROM 40%	37.2	100	Y	Y	1.0042	1
34	D11C40	ZONE DRAIN 11 FROM 40%	37.3	100	Y	Y	1.0042	1
35	D12C40	ZONE DRAIN 12 FROM 40%	36.9	100	Y	Y	1.0042	1
36	D13C40	ZONE DRAIN 13 FROM 40%	38.1	100	Y	Y	1.0042	1
37	D14C40	ZONE DRAIN 14 FROM 40%	37.0	100	Y	Y	1.0042	1
38	D01C80	ZONE DRAIN 01 FROM 80%	78.0	100	Y	Y	1.0016	1
39	D02C80	ZONE DRAIN 02 FROM 80%	79.4	100	Y	Y	1.0016	1
40	D03C80	ZONE DRAIN 03 FROM 80%	76.0	100	Y	Y	1.0016	1
41	D04C80	ZONE DRAIN 04 FROM 80%	77.8	100	Y	Y	1.0016	1
42	D05C80	ZONE DRAIN 05 FROM 80%	77.1	100	Y	Y	1.0016	1
43	D06C80	ZONE DRAIN 06 FROM 80%	78.0	100	Y	Y	1.0016	1
44	D07C80	ZONE DRAIN 07 FROM 80%	79.3	100	Y	Y	1.0016	1
45	D08C80	ZONE DRAIN 08 FROM 80%	78.0	100	Y	Y	1.0016	1
46	D09C80	ZONE DRAIN 09 FROM 80%	79.4	100	Y	Y	1.0016	1
47	D10C80	ZONE DRAIN 10 FROM 80%	76.1	100	Y	Y	1.0016	1
48	D11C80	ZONE DRAIN 11 FROM 80%	77.9	100	Y	Y	1.0016	1
49	D12C80	ZONE DRAIN 12 FROM 80%	77.2	100	Y	Y	1.0016	1
50	D13C80	ZONE DRAIN 13 FROM 80%	77.9	100	Y	Y	1.0016	1
51	D14C80	ZONE DRAIN 14 FROM 80%	79.2	100	Y	Y	1.0016	1

표 4 각 시나리오별 계산 결과 (계속)

SINGLE ADJUSTER WITHDRAWN WITH SPATIAL CONTROL								
Case	FILE NAME	Description	Zone Level	Power	S.C.	B.C.	T. Keff	READ
66	AJFO01	ADJUSTER 01 FULL-OUT	39.8	100	Y	Y	1.00421	1
67	AJFO02	ADJUSTER 02 FULL-OUT	39.2	100	Y	Y	1.00474	1
68	AJFO03	ADJUSTER 03 FULL-OUT	39.7	100	Y	Y	1.00505	1
69	AJFO04	ADJUSTER 04 FULL-OUT	39.9	100	Y	Y	1.00465	1
70	AJFO05	ADJUSTER 05 FULL-OUT	39.7	100	Y	Y	1.00505	1
71	AJFO06	ADJUSTER 06 FULL-OUT	39.3	100	Y	Y	1.00474	1
72	AJFO07	ADJUSTER 07 FULL-OUT	39.9	100	Y	Y	1.00421	1
73	AJFO08	ADJUSTER 08 FULL-OUT	40.4	100	Y	Y	1.00421	1
74	AJFO09	ADJUSTER 09 FULL-OUT	39.4	100	Y	Y	1.00482	1
75	AJFO10	ADJUSTER 10 FULL-OUT	40.0	100	Y	Y	1.00516	1
76	AJFO11	ADJUSTER 11 FULL-OUT	40.3	100	Y	Y	1.00473	1
77	AJFO12	ADJUSTER 12 FULL-OUT	40.1	100	Y	Y	1.00516	1
78	AJFO13	ADJUSTER 13 FULL-OUT	39.4	100	Y	Y	1.00482	1
79	AJFO14	ADJUSTER 14 FULL-OUT	40.3	100	Y	Y	1.00421	1
80	AJFO15	ADJUSTER 15 FULL-OUT	39.8	100	Y	Y	1.00421	1
81	AJFO16	ADJUSTER 16 FULL-OUT	39.5	100	Y	Y	1.00473	1
82	AJFO17	ADJUSTER 17 FULL-OUT	39.6	100	Y	Y	1.00505	1
83	AJFO18	ADJUSTER 18 FULL-OUT	39.9	100	Y	Y	1.00465	1
84	AJFO19	ADJUSTER 19 FULL-OUT	39.6	100	Y	Y	1.00505	1
85	AJFO20	ADJUSTER 20 FULL-OUT	39.3	100	Y	Y	1.00473	1
86	AJFO21	ADJUSTER 21 FULL-OUT	39.8	100	Y	Y	1.00421	1
87	AJHO01	ADJUSTER 01 HALF-OUT	40.0	100	Y	Y	1.004	1
88	AJHO02	ADJUSTER 02 HALF-OUT	38.7	100	Y	Y	1.00421	1
89	AJHO03	ADJUSTER 03 HALF-OUT	38.4	100	Y	Y	1.00429	1
90	AJHO04	ADJUSTER 04 HALF-OUT	39.0	100	Y	Y	1.00415	1
91	AJHO05	ADJUSTER 05 HALF-OUT	38.6	100	Y	Y	1.00429	1
92	AJHO06	ADJUSTER 06 HALF-OUT	38.8	100	Y	Y	1.00421	1
93	AJHO07	ADJUSTER 07 HALF-OUT	40.0	100	Y	Y	1.004	1
94	AJHO08	ADJUSTER 08 HALF-OUT	39.8	100	Y	Y	1.004	1
95	AJHO09	ADJUSTER 09 HALF-OUT	38.9	100	Y	Y	1.00422	1
96	AJHO10	ADJUSTER 10 HALF-OUT	38.6	100	Y	Y	1.00431	1
97	AJHO11	ADJUSTER 11 HALF-OUT	38.9	100	Y	Y	1.00416	1
98	AJHO12	ADJUSTER 12 HALF-OUT	38.6	100	Y	Y	1.00431	1
99	AJHO13	ADJUSTER 13 HALF-OUT	38.9	100	Y	Y	1.00422	1
100	AJHO14	ADJUSTER 14 HALF-OUT	39.9	100	Y	Y	1.004	1
101	AJHO15	ADJUSTER 15 HALF-OUT	39.9	100	Y	Y	1.00401	1
102	AJHO16	ADJUSTER 16 HALF-OUT	38.6	100	Y	Y	1.00422	1
103	AJHO17	ADJUSTER 17 HALF-OUT	38.5	100	Y	Y	1.00429	1
104	AJHO18	ADJUSTER 18 HALF-OUT	39.1	100	Y	Y	1.00414	1
105	AJHO19	ADJUSTER 19 HALF-OUT	38.6	100	Y	Y	1.00429	1
106	AJHO20	ADJUSTER 20 HALF-OUT	38.9	100	Y	Y	1.0042	1
107	AJHO21	ADJUSTER 21 HALF-OUT	40.0	100	Y	Y	1.00401	1

표 4 각 시나리오별 계산 결과 (계속)

MCA CASES								
Case	FILE NAME	Description	Zone Level	Power	S.C.	B.C	T. Keff	READ
350	MCA	MCA BASE CASE	40.0	100	Y	Y	1.004	1
108	MCAC1H	MCA 1st Bank Half-in	35.0	100	Y	Y	1.00106	350
109	MCAC1F	MCA 1st Bank Full-in	38.8	100	Y	Y	0.99794	350
110	MCAC2H	MCA 1st Bank Full-in And 2nd Bank Half-In	33.6	100	Y	Y	0.99566	350
111	MCAC2F	MCA 1st Bank Full-in And 2nd Bank Full-In	36.4	100	Y	Y	0.9933	350
112	MCAN1H	MCA 1st Bank Half-in	39.8	100	N	Y	1.00106	350
113	MCAN1F	MCA 1st Bank Full-in	39.9	100	N	Y	0.99794	350
114	MCAN2H	MCA 1st Bank Full-in And 2nd Bank Half-In	40.0	100	N	Y	0.99566	350
115	MCAN2F	MCA 1st Bank Full-in And 2nd Bank Full-In	40.0	100	N	Y	0.9933	350
116	MCASI1	MCA Rod 01 Stuck-in	34.0	100	Y	Y	1.00161	350
117	MCASI2	MCA Rod 02 Stuck-in	34.0	100	Y	Y	1.00161	350
118	MCASI3	MCA Rod 03 Stuck-in	33.9	100	Y	Y	1.00161	350
119	MCASI4	MCA Rod 04 Stuck-in	34.0	100	Y	Y	1.00161	350

표 4 각 시나리오별 계산 결과 (계속)

ZONE INDUCED TILTS								
Case	FILE NAME	Description	Tilt	Power	S.C.	B.C.	T. Keff	READ
120	ZT1ATB	1ST AZIMUTHAL TOP/BOTTOM	+/-	100	N	N	1.00381	1
121	ZT1ABT	1ST AZIMUTHAL BOTTOM/TOP	+/-	100	N	N	1.00319	1
122	ZTSFSE	1ST AZIMUTHAL SIDE/SIDE	+/-	100	N	N	1.00343	1
123	ZTSESF	1ST AZIMUTHAL SIDE/SIDE	-/+	100	N	N	1.00344	1
124	ZTEFEE	1ST AXIAL END/END	+/-	100	N	N	1.00352	1
125	ZTEEEF	1ST AXIAL END/END	-/+	100	N	N	1.00352	1
126	ZTT045	1ST AZIMUTHAL TOP AT 045	+/-	100	N	N	1.00364	1
127	ZTT135	1ST AZIMUTHAL TOP AT 135	+/-	100	N	N	1.00364	1
128	ZTT225	1ST AZIMUTHAL TOP AT 225	+/-	100	N	N	1.00322	1
129	ZTT315	1ST AZIMUTHAL TOP AT 315	+/-	100	N	N	1.00323	1
130	ZT2A01	2ND AZIMUTHAL 135,315 HI	+/-	100	N	N	1.00338	1
131	ZT2A02	2ND AZIMUTHAL 045,225 HI	+/-	100	N	N	1.00337	1
132	ZT2A03	2ND AZIMUTHAL T/B HI	+/-	100	N	N	1.00348	1
133	ZT2A04	2ND AZIMUTHAL SIDES HI	+/-	100	N	N	1.00324	1
134	ZTAX01	1ST AZIMUTHAL-AXIAL S=HI	+/-	100	N	N	1.00338	1
135	ZTAX02	1ST AZIMUTHAL-AXIAL S=LO	-/+	100	N	N	1.00338	1
136	ZTAX03	1ST AZIMUTHAL-AXIAL T=HI	+/-	100	N	N	1.00345	1
137	ZTAX04	1ST AXIMUTHAL-AXIAL T=LO	-/+	100	N	N	1.00344	1
138	ZT1R01	1ST RADIAL CENTER HI	+/-	100	N	N	1.00343	1
139	ZT1R02	1ST RADIAL OUTER HI	+/-	100	N	N	1.00325	1

표 4 각 시나리오별 계산 결과 (계속)

HARMONIC TILT								
Case	FILE NAME	Description	Zone Level	Power	S.C.	B.C.	T. Keff	READ
140	HTTB00	Harmonic Tilt Top/Bottom At Time 00 Hrs	40	100	N	N	-	1
141	HTTB01	Harmonic Tilt Top/Bottom At Time 01 Hrs	40	100	N	N	-	1
142	HTTB02	Harmonic Tilt Top/Bottom At Time 02 Hrs	40	100	N	N	-	1
143	HTTB03	Harmonic Tilt Top/Bottom At Time 03 Hrs	40	100	N	N	-	1
144	HTTB04	Harmonic Tilt Top/Bottom At Time 04 Hrs	40	100	N	N	-	1
145	HTSS00	Harmonic Tilt Side/Side At Time 00 Hrs	40	100	N	N	-	1
146	HTSS01	Harmonic Tilt Side/Side At Time 01 Hrs	40	100	N	N	-	1
147	HTSS02	Harmonic Tilt Side/Side At Time 02 Hrs	40	100	N	N	-	1
148	HTSS03	Harmonic Tilt Side/Side At Time 03 Hrs	40	100	N	N	-	1
149	HTSS04	Harmonic Tilt Side/Side At Time 04 Hrs	40	100	N	N	-	1

표 4 각 시나리오별 계산 결과 (계속)

STARTUP AFTER SHORT SHUTDOWN (30MIN)								
Case	FILE NAME	Description	Zone Level	Power	S.C.	B.C.	T. Keff	READ
150	SSSD01	All Banks Out + Xenon At 0.645 Hrs	20	0.001	N	Y	1.004	1
151	SSSD02	All Banks Out + Xenon At 0.476 Hrs	69.3	56	Y	Y	1.004	1
152	SSSD03	Bank 7 Full-In + No Time Step	8.7	65	Y	Y	1.004	1
153	SSSD04	Bank 7 Full-In + Xenon At 0.533 Hrs	69.3	65	Y	Y	1.004	1
154	SSSD05	Bank 6 Full-In + No Time Step	21.9	68	Y	Y	1.004	1
155	SSSD06	Bank 6 Full-In + Xenon At 0.5867 Hrs	69.9	68	Y	Y	1.004	1
156	SSSD07	BANK 5 FULL-IN + NO TIME STEP	24.8	76	Y	Y	1.004	1
157	SSSD08	BANK 5 FULL-IN + XENON AT 0.54 HRS	68.7	76	Y	Y	1.004	1
158	SSSD09	BANK 4 FULL-IN + NO TIME STEP	28.3	87	Y	Y	1.004	1
159	SSSD10	BANK 4 FULL-IN + XENON AT 0.50 HRS	70.0	87	Y	Y	1.004	1
160	SSSD11	BANK 3 FULL-IN + NO TIME STEP	35.4	91	Y	Y	1.004	1
161	SSSD12	BANK 3 FULL-IN + XENON AT 0.57 HRS	69.1	91	Y	Y	1.004	1
162	SSSD13	BANK 2 FULL-IN + NO TIME STEP	36.4	95	Y	Y	1.004	1
163	SSSD14	BANK 2 FULL-IN + XENON AT 1.06 HRS	69.7	95	Y	Y	1.004	1
164	SSSD15	BANK 1 FULL-IN + NO TIME STEP	46.7	100	Y	Y	1.004	1
165	SSSD16	BANK 1 FULL-IN + XENON AT 90.0 MIN	70.3	100	Y	Y	1.004	1
166	SSSD17	ALL BANKS IN + XENON AT 180.0 MIN	68.6	100	Y	Y	1.004	1
167	SSSD18	ALL BANKS IN + XENON AT 270.0 MIN	57.2	100	Y	Y	1.004	1

표 4 각 시나리오별 계산 결과 (계속)

STEPBACK TO 60% FP								
Case	FILE NAME	Description	Zone Level	Power	S.C	B.C	T. Keff	READ
191	SBCK01	ALL BANKS IN + XENON AT 0.1396 HRS	19.9	60	Y	Y	1.004	1
192	SBCK02	BANK 1 OUT + NO TIME OUT	41.1	60	Y	Y	1.004	191
193	SBCK03	BANK 1 OUT + XENON AT 0.1696 HRS	19.9	60	Y	Y	1.004	192
194	SBCK04	BANK 2 OUT + NO TIME STEP	48.5	60	Y	Y	1.004	193
195	SBCK05	BANK 2 OUT + XENON AT 0.2939 HRS	19.2	60	Y	Y	1.004	194
196	SBCK06	BANK 3 OUT + NO TIME STEP	48.0	60	Y	Y	1.004	195
197	SBCK07	BANK 3 OUT + XENON AT 0.4194 HRS	19.4	60	Y	Y	1.004	196
198	SBCK08	BANK 4 OUT + NO TIME STEP	51.6	60	Y	Y	1.004	197
199	SBCK09	BANK 4 OUT + XENON AT 6.945 HRS	69.3	60	Y	Y	1.004	198
200	SBCK10	BANK 4 IN + NO TIME STEP	30.2	60	Y	Y	1.004	199
201	SBCK11	BANK 4 IN + XENON AT 4.8136 HRS	70.5	60	Y	Y	1.004	200

표 4 각 시나리오별 계산 결과 (계속)

SHIM CASES								
Case	FILE NAME	Description	Zone Level	Power	S.C	B.C	T. Keff	READ
202	SHIM01	ALL BANKS IN + STEADY STATE XENON	20.7	100	Y	Y	1.0054	1
203	SHIM02	BANK 1 OUT + NO TIME STEP	42.4	94	Y	Y	1.0054	202
204	SHIM03	BANK 1 OUT + XENON AT 4 HRS	29.3	94	Y	Y	1.0054	203
205	SHIM04	BANK 1 OUT + STEADY STATE XENON	20.4	94	Y	Y	1.00712	204
206	SHIM05	BANK 2 OUT + NO TIME STEP	49.3	87	Y	Y	1.00712	205
207	SHIM06	BANK 2 OUT + XENON AT 4 HRS	33.6	87	Y	Y	1.00712	206
208	SHIM07	BANK 2 OUT + STEADY STATE XENON	18.7	87	Y	Y	1.0095	207
209	SHIM08	BANK 3 OUT + NO TIME STEP	48.3	82	Y	Y	1.0095	208
210	SHIM09	BANK 3 OUT + XENON AT 4 HRS	37.5	82	Y	Y	1.0095	209
211	SHIM10	BANK 3 OUT + STEADY STATE XENON	19.9	82	Y	Y	1.01168	210
212	SHIM11	BANK 4 OUT + NO TIME STEP	53.3	79	Y	Y	1.01168	211
213	SHIM12	BANK 4 OUT + XENON AT 4 HRS	50.5	79	Y	Y	1.01168	212
214	SHIM13	BANK 4 OUT + STEADY STATE XENON	20.5	79	Y	Y	1.01404	213
215	SHIM14	BANK 5 OUT + NO TIME STEP	55.6	68	Y	Y	1.01404	214
216	SHIM15	BANK 5 OUT + XENON AT 4 HRS	22.1	68	Y	Y	1.01404	215
217	SHIM16	BANK 5 OUT + STEADY STATE XENON	20.5	68	Y	Y	1.01680	216
218	SHIM17	BANK 6 OUT + NO TIME STEP	59.1	61	Y	Y	1.01680	217
219	SHIM18	BANK 6 OUT + STEADY STATE XENON	18.5	61	Y	Y	1.01963	218
220	SHIM19	BANK 7 OUT + NO TIME STEP	75.9	52	Y	Y	1.01963	219
221	SHIM20	BANK 7 OUT + STEADY STATE XENON	18.5	52	Y	Y	1.0234	220

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |

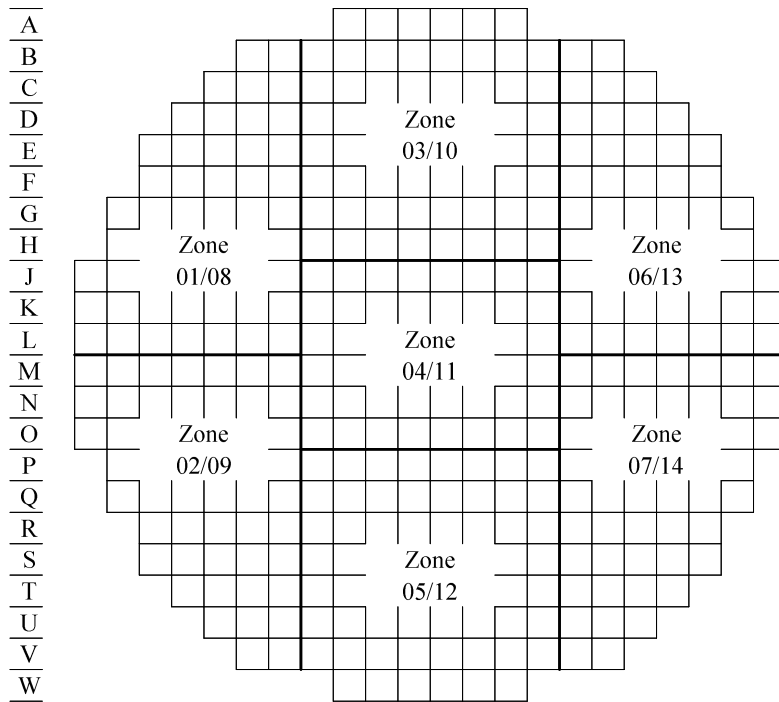


그림 1 Zone 영역

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |

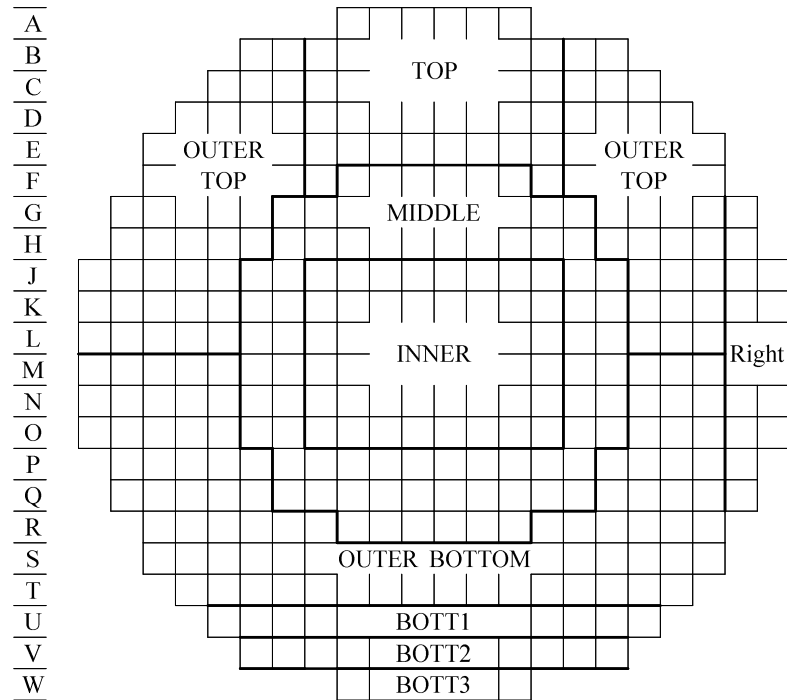


그림 2 방출조사도 영역

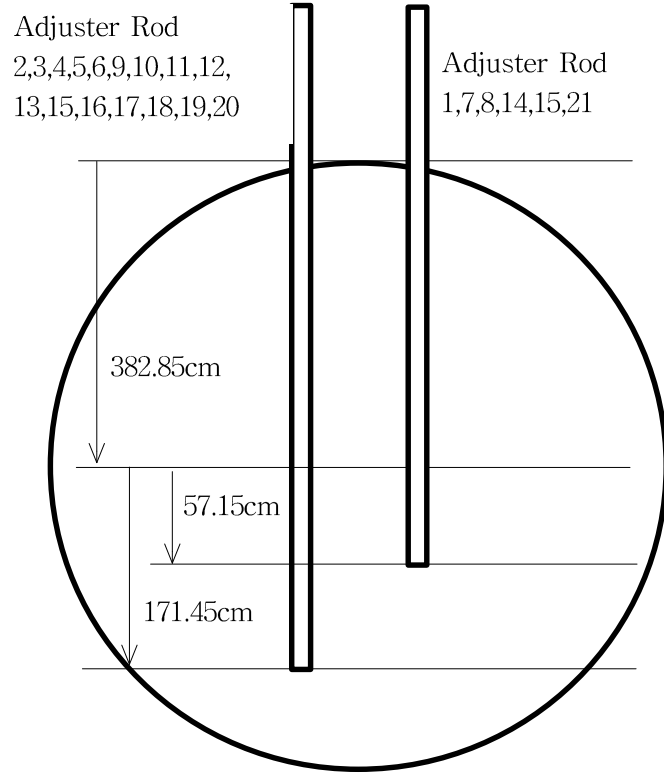


그림 3 Adjuster Rod의 세로방향 위치

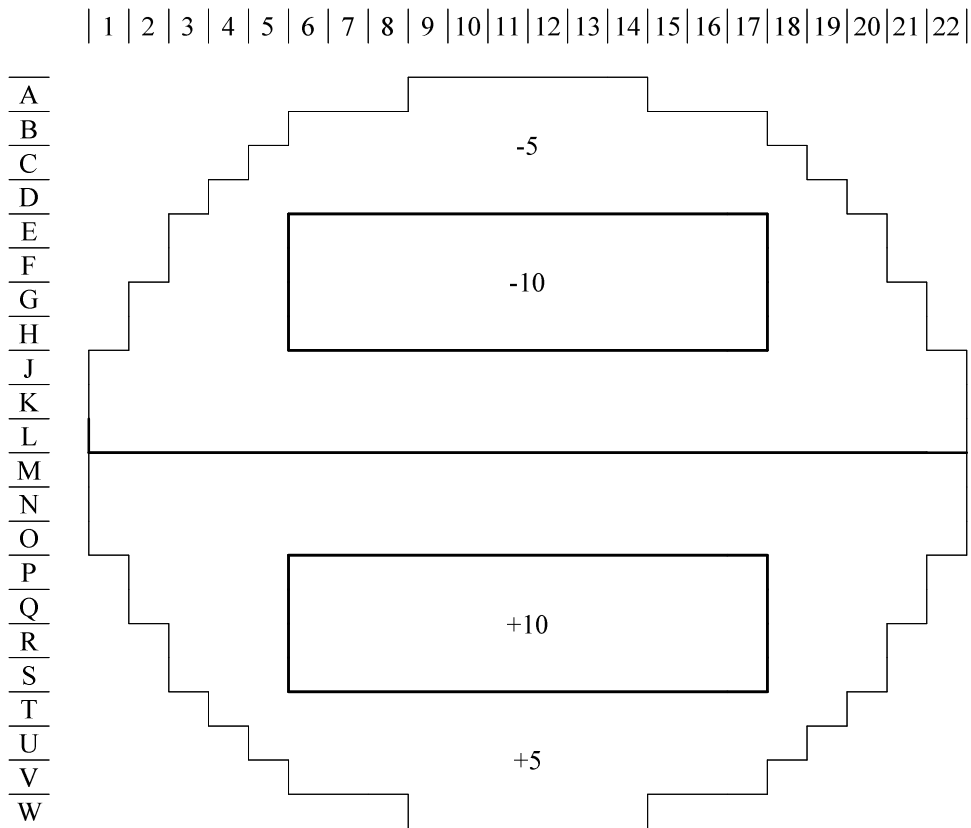


그림 4 Harmonic Top/Bottom Xenon Tilt

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |

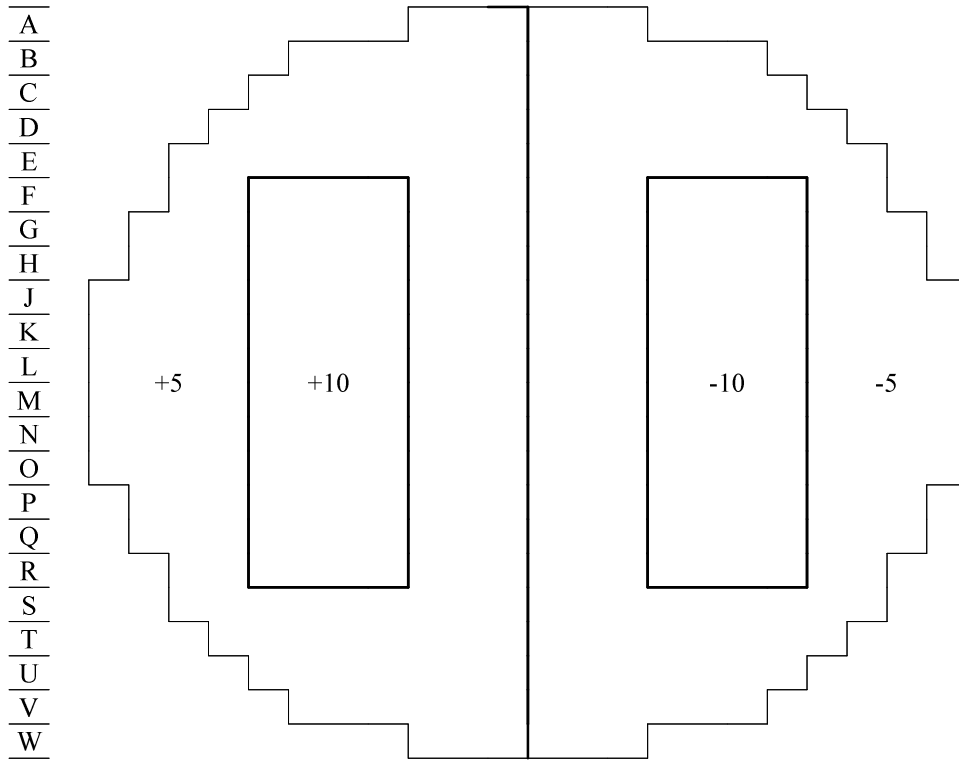
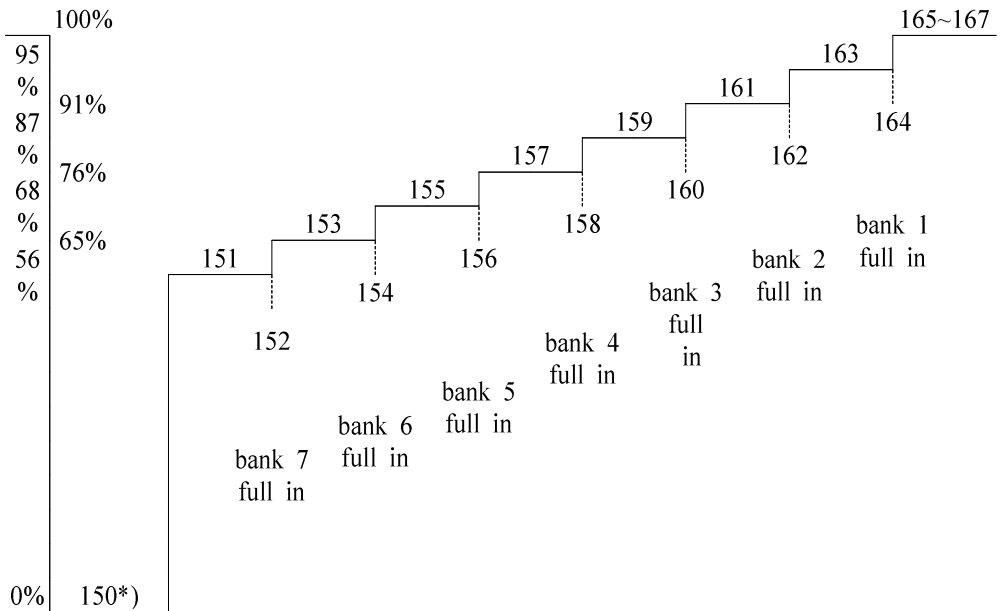


그림 5 Harmonic Side/Side Xenon Tilt



*) case 번호

그림 6 Startup after Short Shutdown 시나리오

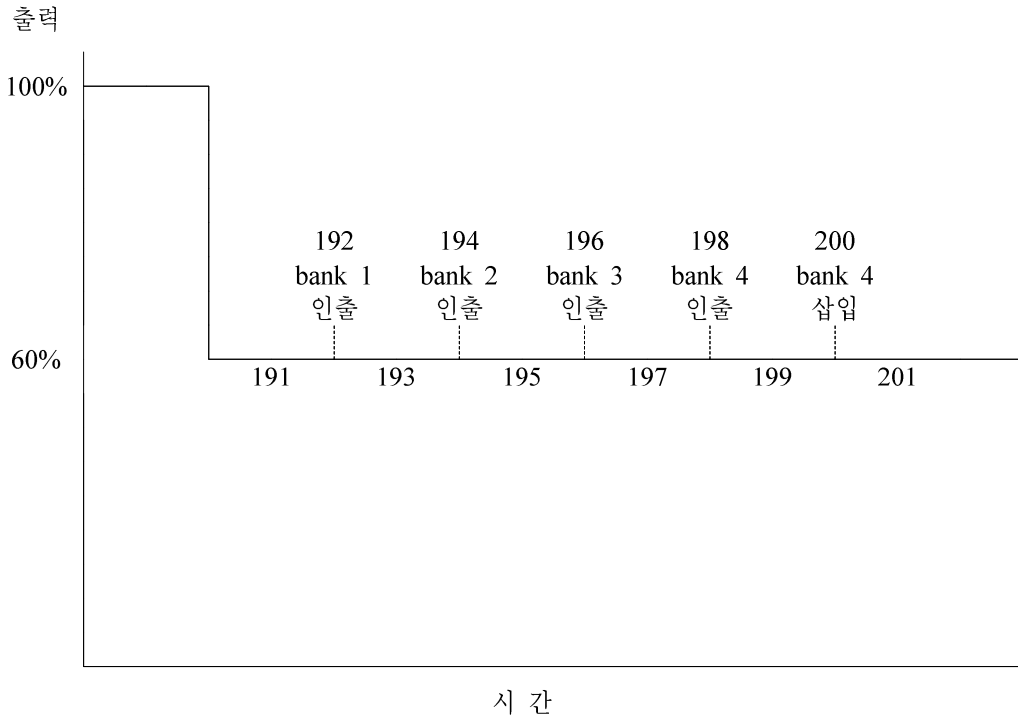


그림 7 Stepback to 60% FP 시나리오

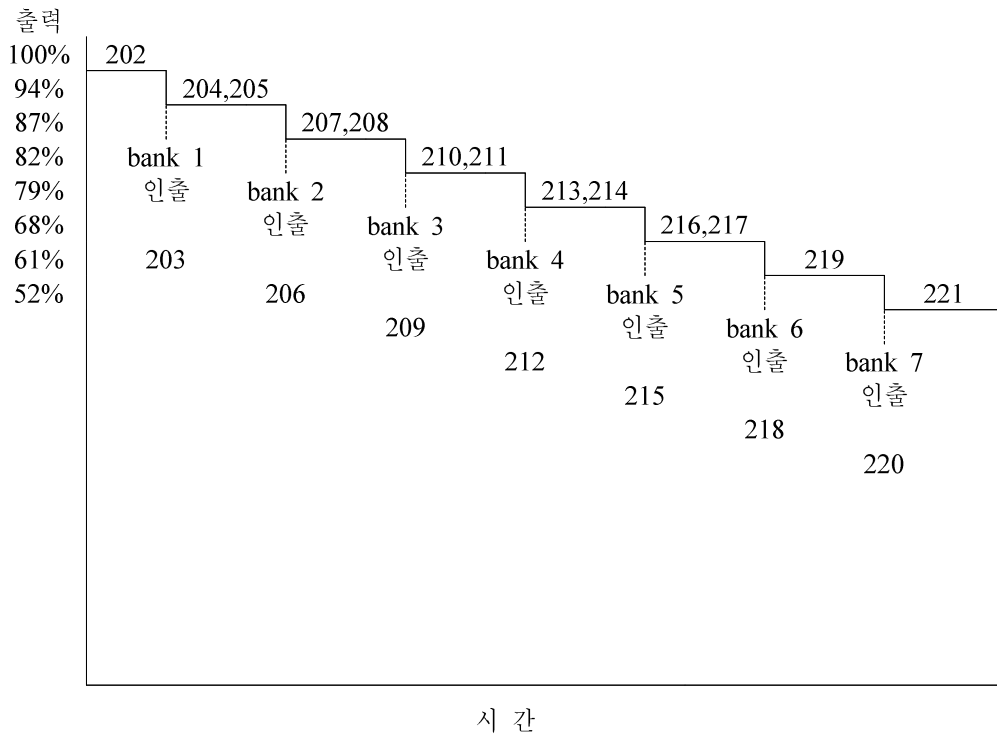


그림 8 SHIM 운전 시나리오