

# 原子力 5, 6號機 負荷追從運轉試驗

鄭 南 教

(韓電 古里原子力本部 技術部長)

## I. 概 要

電力系統의 基底負荷 (Base Load) 用으로 運轉되는 原子力發電所의 부하 분담을 증가와 單位容量의 大型化는 주말/심야 輕負荷時 國부영역의 출력편중현상을 加중화시키고 있어 전체 전력계통과 原電의 安全性 確保에 많은 문제점을 제기하고 있고, 기존 高温·高壓 大容量 火力發電所는 변동부하시 계통 주파수 安定化에 기여할 수 있도록 設備改善이 요구되고 있으며 또한 原電의 效率性, 安全運轉 및 기술정착도를 나타내는 지표인 利用率과 稼動率 向上에 저해 요인으로 잠재하는 점을 감안할 때, 原子力 技術自立 目標의 달성으로 2000년대 기술의존형인 原子力에너지 安定化 體制로 구축하여 에너지 建設의 중추적 역할을 담당할 것으로 기대되는 현시점에서, 原電設備의 합리화 운영 方面으로 제기된 부하추종운전(Load follow operation)은 해결되어야 할 당면과제라 하겠다.

本稿에서는 原子力 6號機에서 시행된 부하추종운전의 시험경위, 결과분석 및 도출된 문제점을 현장경험 바탕으로 논술하고자 한다.

## II. 6號機 運轉經驗

### 1. 負荷追從運轉技法紹介

#### 가. CAOC (Constant Axial Offset Control)

原子力發電所 負荷追從運轉技法으로는 가장 기본적인 것이며, 일정한 A. O 운전범위내에서 부하추종운전을 실시한다.

表 1은 각 원자력발전소의 ΔI 운전범위이다.

#### 나. RAOC (Relaxed Axial Offset Control)

CAOC 運轉이 安全制限値는 물론 運轉制限値도 고려하여 만족시키는 운전영역내에서 운전하는데 비해, 同 運轉技法은 爐心 核設計上의 충분한 여유를 고려, 타당성을 확인후 안전제한치만을 고려한 운전기법으로 原子爐 運轉이 용이하고, 부하추종운전중 출력증가 능력 등을 향상시킬 수 있다.

#### 다. CNTR (Center Approach)

CAOC 운전범위내에서 ΔI를 가능한 ΔI目標値에 접근하여 운전하는 技法이다.

#### 라. MINB (Minimum Boration)

同 方法은 제어봉 인출에 따른 ΔI가 ΔI운전범위를 벗어나지 않게 하기 위하여 봉소희석 능력에 의존하며, 간략한 절차는 다음과 같다.

(1) 出力減發은 제어봉 삽입과 봉소주입으로 하되, 가능한 제어봉을 爐心上部에 위치하도록 유지하고, ΔI를 ΔI운전범위내에서 운전되도록 봉소량 조절.

(2) 出力減發後 봉소희석 조절로 Xenon量 및 ΔI를 제어한다.

(3) 出力增發時에도 봉소희석 조절로서 Xenon量 및 ΔI를 제어한다.

(表 1) 各 原電의 ΔI 운전범위

ΔI  운전 범위 호기	1 주 기		2 주기이상 (ΔI  운전범위)
	3,000MWD/ MTU이하	3,000MWD/ MTU이상	
1	±5%	+ ±5%	±5%
2	±5%	+3%, -12%	+3%, -12%
5.6	±5%	+3%, -9%	+3%, -12%
7.8	+3%, -9%	+3%, -12%	+3%, -12%

마. SPINR (Spinning Reserve)

동 운전기법은 그림 1 처럼 原子爐 出力 85% 이상에서는  $\Delta I$ 를  $\Delta I$ 운전범위의 上限値에 위치하도록 유도하고, 원자로 출력 85% 이하에서는  $\Delta I$ 를  $\Delta I$ 운전범위의 下限値에 위치하도록 유도하면서 운전하는 기법이다.

2. 試驗內容

본 시험은 初期試運轉試驗 (Phase III)한 항목으로 채택되어 WH社에서 공급한 試運轉試驗節次書 (6S-E-XX-33)에 따라 수행하며, 출력변화형태는 기 개발된 여러가지 출력변화형태중 동 시험절차서에서 WH社가 권고한 12-3-6-3 시간 유형 (그림 2 참조)에 100% - 50% - 100% 출력변화를 선택하였고, 負荷追從運轉技法은 앞장에서 소개한 방법중 6號機에 가장 적합한 방법을 선택하기 위하여 제 1 주기에서는 SPINR 제어기법을, 제 2 주기에서는 CNTR, SPINR 제어기법을 채택하였다.

또한 負荷追從運轉時 20분 간격으로 爐外核

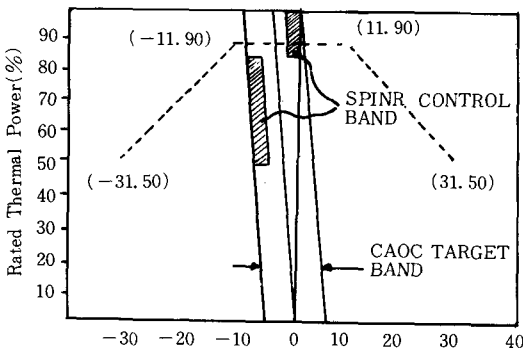
計裝 (NIS) 과 所內 電算機를 이용하여 간접적으로 爐心의 主要運轉變數 ( $\Delta I$ , 출력,  $T_{avg}$  제어봉 위치, 붕산농도 등)를 확인하며, 실제 노심에서의 주요인자 ( $F_{T_0}$ ,  $A_0$ , Tilt 등) 변화상태를 파악하기 위해 출력과도상태 (출력증감발시)에서 사분노심 출력분포 측정을 실시하고 각 출력 (100%, 50%)에서는 지논생성/소멸에 따른 반응도 보상을 정확히 실시하여 일정출력을 유지토록 한후 全 爐心出力分布를 측정한다.

상기의 방법에 따라 WH社에서 공급한 原子力 6號機가 부하추종운전을 실시하더라도 1, 2 측 주요변수가 技術指針書 制限値를 초과하지

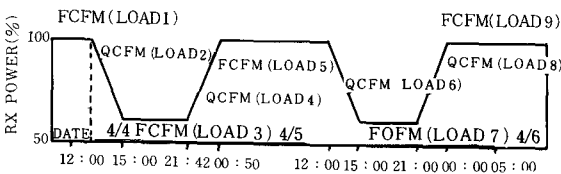
〈表 2〉 6號機 負荷追從運轉時 豫想Xe反應度 變化

TIME	% XE	XE(REACTIVITY) (PCM)	TIME	% XE	XE(REACTIVITY) (PCM)
12:00	100	0	11:00	89.5	306.075
12:45	102.1	-61.215	12:00	90.5	276.925
13:30	105.6	-163.24	12:45	93	204.05
14:15	110.6	-308.99	13:30	97	204.45
15:00	115.8	-460.57	14:15	101.8	87.45
16:00	124.1	-702.515	15:00	107.3	-52.47
17:00	129.0	-845.35	16:00	115.3	-212.795
18:00	131.6	-921.14	17:00	120.2	-445.995
19:00	132.4	-944.46	18:00	123	-588.83
20:11	132.0	-932.8	19:00	123.4	-670.45
21:00	130.6	-891.99	20:00	123.5	-682.11
21:45	126.3	-766.645	21:00	122.7	-685.025
22:30	119.8	-577.17	21:45	119	-661.705
23:15	111.1	-323.565	22:30	113.3	-553.85
00:00	104.0	-116.6	23:15	106.6	-387.695
01:00	94.3	166.166	00:00	99.4	-192.39
02:00	88.8	326.48	01:00	90.6	17.49
03:00	85.9	411.015	02:00	85.8	274.01
04:00	84.6	448.91	03:00	83.3	413.933
05:00	84.4	454.74	04:00	82.4	486.805
06:00	84.8	443.08	05:00	82.4	513.04
07:00	85.5	422.675	06:00	83.1	513.04
08:00	86.5	393.525	07:00	84	492.635
09:00	87.6	361.46	08:00	85.1	466.4
10:00	88.6	332.31	09:00	86.3	434.335
			10:00	87.5	399.355
					364.375

〈그림 1〉 代表的인 SPINR CONTROL BAND



〈그림 2〉 負荷追從運轉時 出力分布 測定時點



않고 안정되게 운전할 수 있음을 확인한다.

3. 試驗經緯

지논(Xe)평형상태 유지를 위하여 原子爐 全出力(100%)에서 40시간 이상 운전한 시점에서 全出力 分布 測定을 실시한 다음 터빈出力을 약 3MWe 減發率로 감발에 착수하였고, 원자로 출력제어는 수동으로서 상·하부 출력편차를 운전범위(목표치±5%)내로 유지하였다.

또한 원자로 출력 100%, 50%에서는 全爐心 出力分布 測定(FCFM)을 실시하였고(그림 2 참조), 出力過渡狀態에서는 사분노심 출력분포 측정(QCFM)을 실시하여 爐心の 安定狀態를 확인하였으며 특히 出力增減發時 지논과 도상상태를 붕산열재생계통(BTRS)을 이용하여 제어함으로써 보다 안정된 운전에 기여하였다.

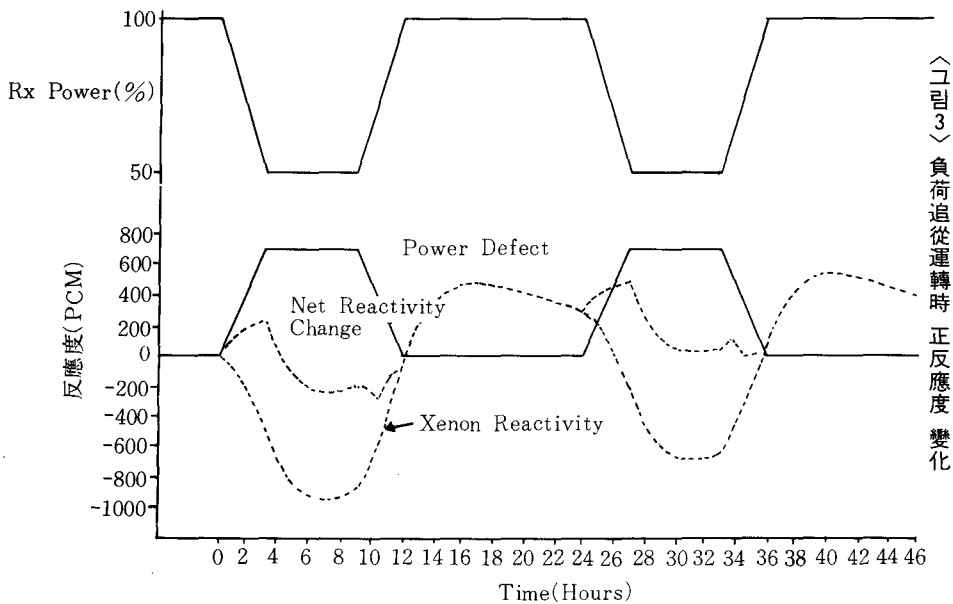
가. 試驗準備

出力變化에 따른 지논(Xe)量 및 出力缺損(Power Defect)量 계산을 위해 초기 100%출력에서의 지논 반응도를 0pcm으로 가정하고 表 2와 같이 계산하였고 출력결손량은 核設計報告書(NDR)의 설계값을 적용, 즉 부하추종운전시 실제 노심에 부여되는 正反應度量(Net Reactivity)의 변화는 그림 3과 같다고 가정하였다.

또한 BTRS(Boron Thermal Regeneration System.)를 이용함으로써 Xe과도현상과 출력결손에 따른 반응도 보상에 효과적으로 대응하고, 液體廢棄物 生成量을 극소화하며, 특히 爐心 末期 BRS의 용량부족을 경감시킬 수 있는 효과를 기대하면서 영출력(HZP)상태에서 4개의 탈염기중 3개에 1,000ppm붕산수로 충분히 포화시킨후 성능시험을 실시하여 성능을 확인하였으며, 부하추종운전시 예상되는 냉각재 붕산농도인 750ppm의 붕산수로 재차 3개의 탈염기에 통과시켜 입구 출구의 붕소량이 일정하게 유지되도록 탈염기를 재생시켰다.

나. 第1週期 負荷追從運轉

○負荷追從運轉을 위해 미리 계산한 正反應度(Net Reactivity)量을 붕소량으로 환산하여 出力減發과 동시, 일시에 주입함으로써 2次測出力減發에 비해 1次側 노심 냉각재온도 하강이 과도하여 심한 온도 불일치상태가 나타나므로 즉시 2次側 出力減發率을 증가시키고, 1次側에서는 붕소회석을 동시에 실시하여 1, 2차측 온도평형(Tavg=Tref)을 유도하였으며, 이때 出



力過渡狀態에서 노심상태는 다음 要因에 기인하여 爐心出力分布가 상부쪽으로 급속히 이동하는 현상을 보였다.

- 출력감소에 따른 출력결손 (Power Defect) 이 양반응도로 작용.
- 과 붕소주입에 따른 일시적 노심 하부쪽에 부반응도 작용.
- 일차측 과잉온도 감소 운전에 따른 출력결손이 더욱 양반응도 작용.
- 출력감소에 따른 노심상부 보다 노심하부에서 보다 빠른 농도 증가로 노심하부쪽 부반응도 증가.

○出力減發後 1시간 정도는  $\Delta I$ (상, 하부 출력편차)가  $\Delta I$ 운전범위 상한치로 이동되어 운전되었으나, 계속적인 붕소회석(초기 과 붕소주입 및 온도환원을 위해)과 제어봉 삽입으로  $\Delta I$ 를 爐心部로 이동하도록 유도하였다.

○出力 50%상태에서는 爐心上部보다 下部에서 보다 빨리 지논이 生成되기 때문에 제어봉을 인출하거나 붕소회석을 실시해야 한다.

이에 따라  $\Delta I$ 가 상부로 이동할 경우를 고려, 미리 충분히 제어봉을 삽입(약 110 Steps)하고, 붕산열 재생계통(BTRS)운전을 실시하였다.

○出力 50%도달후에는 지논 생성에 의한 負反應度를 붕산열 재생계통의 붕소회석 운전으로 보상하였으나, 50%도달 2시간후부터는 出力缺損에 따른 陽反應度 보다 지논 생성에 의한 負反應도가 더욱 커짐에 따라 인위적인 붕산회석을 병행하여 실시하고, 제어봉 조정으로  $\Delta I$ 값을 운전범위 하한치로 이동시켰다.

○6시간 동안 50%출력 유지후 出力增加時에는 初期 약간의 붕소회석을 실시하고,  $\Delta I$ 값이 운전범위 하한치에 있음을 고려하여 가능한 제어봉을 인출하여 출력을 增發하였고, 出力增發에 따른 지논붕괴(양반응도)는 BTRS의 붕소주입운전으로 보상하였다.

○100% 출력 도달후 약 6시간후에는 爐心上部보다 下部쪽으로 지논량이 이동되어,  $\Delta I$ 가

운전범위 상한치로 이동되므로 약간의 붕소회석과 제어봉 삽입으로  $\Delta I$ 값을 目標值(-4.5% 근처로 이동 조정하였다.

다. 第2週期 負荷追從運轉

○出力減發을 위해 初期에 약간의 붕소주입을 실시하고 BTRS를 이용, 지논 生成을 보상해 주면서 가능한 제어봉 삽입으로 出力減發을 실시하였다.

○出力減發中 爐心 下部에서의 지논량의 증가와 溫度再分布效果에 의해  $\Delta I$ 가 上部로 이동됨을 알 수 있었으며, 이때 붕소주입을 멈추고 계속 제어봉만을 삽입하여 출력을 減發함으로써  $\Delta I$ 가 목표치 근처에서 安定되게 運轉되었고, 지논 생성에 따른 負反應도는 BTRS의 붕소회석운전으로 정확히 보상해줌으로써 1,2次側 온도평형이 이루어져 安定된 출력감발을 실시하였다.

○原子爐 出力이 약60%쯤 도달되어서는 붕소회석을 실시한후 제어봉을 충분히 삽입하여  $\Delta I$ 를 운전범위 하한치에서 유지될 수 있도록 유도하였다(이는 출력증발시 제어봉 인출에 의한 出力增發에 실시하여도  $\Delta I$ 가  $\Delta I$ 운전범위 상한치를 벗어나지 않도록 하기 위함).

○50%출력 도달 이후에도 그림 3에서 계산된 지논량의 변화를 BTRS로써 보상하고, 出力變化는 약간의 붕소량 변화와 제어봉을 이용함으로써 100%출력 도달까지 매우 安定된 운전

(表 3) 試驗結果와 技術指針書 比較

변 수 출 력	시 험 결 과		기술지침서 요구사항		비 고
	50%	100%	50%	100%	
F <sub>z</sub>	1.9703	1.9232	4.64	2.32	(표 4) INCORE 결과참조
반경방향경사도(Radial Tilt)	최대치: 1.0126	최대치: 1.002	1.02이하	1002이하	(표 4) INCORE 결과참조
제 어 봉 삽 입 한 계	105스텝이상	185스텝이상	제어봉 D 59 스텝	제어봉 D 160 스텝	(그림 4) 참 조
$\Delta I$	최대: -4.2 최소: -6.9	최대: -0.112 최소: -6.3	-7.25<	-9.5< $\Delta I$ <+0.5	(그림 4) 참 조

을 실시하였다.

4. 試驗結果

가. 허용기준

出力增減中 지능過渡狀態 및 진동으로 인하여 爐心 主要變數의 變化상태는 그림 4 와 같으며, 技術指針書의 운전제한치 초과 여부에 대한 결과는 表 4 와 같다.

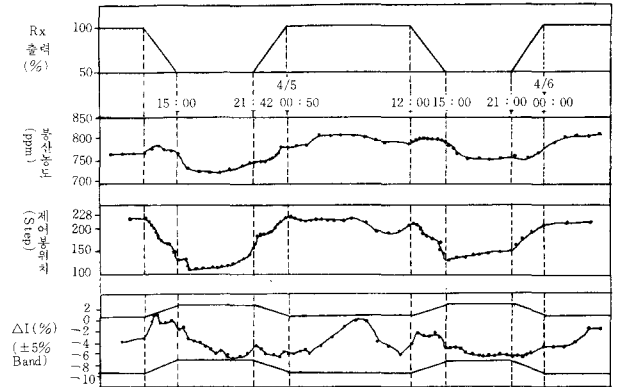
III. 問題點 分析

1. 運轉上 問題點

○試驗 當時 지능(Xe) 및 옥소(Iodine) 分布의 精確한 운전값을 제공할 수 있는 所內 電算機의 相關 Progrm이 문제점으로 出力變化에 따른 지능량을 수동으로 계산하여 精確한 봉소주입 및 희석량을 산출하지 못함으로서 爐心の 過渡

渡狀態 制御에 많은 어려움을 야기시켰다.

○第 1 過期 負荷追從運轉은 SPINR (Spinning Reserve) 제어방법을 채택하여 제어하고자 했으나, 초기 과 봉산주입으로 인하여 동 제어방법 <그림 4> 負荷追從運轉時 主要變數 變化狀態



<表 4> 負荷追從運轉時 INCORE 結果

변수 일시	RX Power (%)	φ - Map I - D	A. O (%)	F <sub>z</sub>	T F Q	N F ΔH	INCORE		
							0.9938	QUADRANT TILT	
4/4 10:30	99.45	LOAD1 (FCFM)	-4.278	1.24482	1.8533	1.4045	1.0018	0.9938	0.993
							1.0060	0.9984	1.0019
13:26	71.8	LOAD2 (QCFM)	-0.325	1.241884	1.8536	1.3909	1.000	1.000	1.002
							1.000	1.000	0.998
16:40	50.8	LOAD3 (FCFM)	-5.868	1.272823	1.9485	1.4336	1.0002	0.9862	0.9920
							1.0128	1.0008	1.0126
23:40	85.65	LOAD4 (QCFM)	-8.135	1.289514	1.9486	1.3941	1.000	1.000	1.002
							1.000	1.000	0.998
4/5 09:35	98.45	LOAD5 (FCFM)	-5.587	1.272117	1.9232	1.4054	1.0025	0.9956	1.0010
							1.0046	0.9973	0.9990
14:10	63.48	LOAD6 (QCFM)	-2.489	1.258506	1.8919	1.3927	1.000	1.000	1.0010
							1.000	1.000	0.999
15:48	50.28	LOAD7 (FCFM)	-8.969	1.291058	1.9703	1.4325	1.0002	0.9907	0.9947
							1.0092	0.9999	1.0079
22:30	79.33	LOAD8 (QCFM)	-8.357	1.278697	1.9094	1.3840	1.000	1.000	1.002
							1.000	1.000	0.998
4/6 05:20	97.30	LOAD9 (FCFM)	-1.072	1.242941	1.9006	1.4104	1.0009	0.9955	1.0000
							1.0063	0.9973	1.0020

〈表5〉 터빈振動

운전형태	정상운전시 100%	Load Following 시(최고치)	Turbin Rolling	High Alarm set point
진동정도	0.04 mm	0.06 mm	0.06 mm	0.1 mm

이 파괴되어 CNTR 제어방법과 MINB 제어방법을 복합적으로 실시하여 ΔI가 가능한 ΔI 운전 범위내에서 운전될 수 있도록 유도하였다.

○第2週期에서는 初期부터 BTRS로써, 지느과도현상을 제어하고 가능한 제어봉을 이용하여 ΔI값을 目標値에 접근시키는 CNTR 제어방법을 시도하면서 SPINR 제어방법을 채택하였다.

2. 2次側 運轉變數에 미치는 問題點

○터빈振動

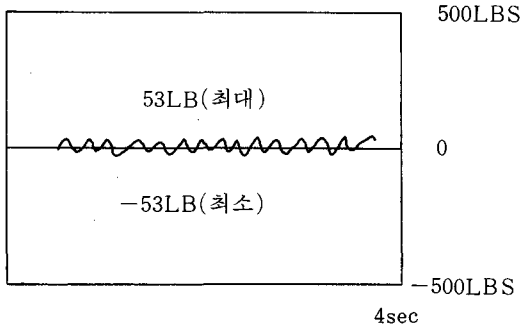
出力 50%로 減發運轉中 터빈진동은 初期에 약간 增加하였고 出力上昇時는 100% 출력 운전 진동값보다 상승하였으나(表5 참조) 운전 허용값 이내였다.

그러나 저압터빈의 진동문제는 본시험이 요구하는 出力增減時의 변동함수 뿐만이 아니므로 반복되는 出力變化에 의한 진동으로 야기되는 베어링의 손상 등 관련 기술적인 分析이 요구된다.

○각종 완충기(Snubber) 및 배관 진동

출력변화시 主要機器의 배관 및 완충기의 진동이 그림5, 6과 같이 크게 증가함으로써, 반복 운전주기에 따라 발생하는 진동으로 야기되는 Creep현상에 대한 파단사고를 방지할 수 있는

〈그림 5〉 10%出力 變動時 主蒸氣配管系統 振動形態



〈表6〉 放出 冷却材

주 기 (%) (노심수명)	10%	50%	70%	비고
냉각재임계농도	730ppm	480ppm	300ppm	제2주기운전
봉소 회석량(m <sup>3</sup> )	약~30m <sup>3</sup>	약~48m <sup>3</sup>	약~85m <sup>3</sup>	제어봉고정
봉소 주입량(m <sup>3</sup> )	3.2m <sup>3</sup>	3.4m <sup>3</sup>	3.6m <sup>3</sup>	제어봉고정

사전 응력계산이 시정되어야 할 것이다.

○Auto Run-up unit (ARU)의 改善

負荷追從運轉 模型에 따라 터빈出力의 自動增減發이 가능한 ARU의 설정이 요구된다.

3. BTRS設備의 問題點

○정확한 爐心內的 反應度 變化를 보상에 주기 위한 냉각재 농도 변화(연소도) 및 탈염기 전단 유량조절 밸브 조정에 따른 봉산화/주입율을 정확히 알 수 있는 特性曲線의 개발.

○상기 특성곡선에 따라 봉산화/주입의 운전방식 전환시 실제 爐心에 反應度가 투입되는 정확한 反應時間 測定.

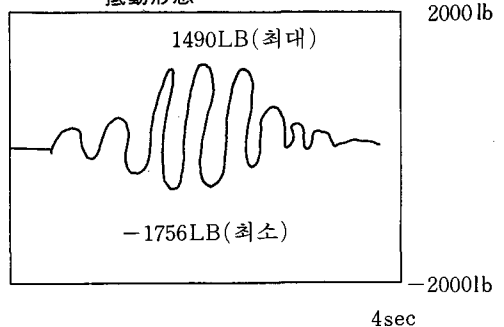
4. 硼酸回收系統의 問題點

본 시험을 통하여 방출되는 冷却材는 表6과 같으며, 증발기의 處理能力에 따라 廢棄物管理 能力에 직결된다.

IV. 結 論

原子力發電所는 試運轉過程을 통하여 核設計 및 爐心의 健全性立證試驗을 여러 방법으로 시행하였으나, 부하추중운전이 요구하는 출력변화형태의 반복적 과도상태에서 原子爐의 安全

〈그림 6〉 50%出力 變動時 主蒸氣配管系統 振動形態





性 確保 및 安全運轉을 뒷받침 할 수 있는 運轉 經驗이 축적된다면, 당면하고 있는 例로서 原電 5,6號機 運轉中 어느 한 Unit의 停止事故時 電力系統에 파급되는 주파수 강하의 영향(表7 참조)을 고려할때 原電의 負荷追從運轉技法 開發은 필수적이라고 주장할 수 있다.

그러나 原子力 5,6號機에서 시행한 부하추중 운전시험은 WH社서 공급한 PWR 원자력발전소의 12-3-6-3 시간유형에 100%-50%-100% 출력변화형태의 부하추중운전을 적용할시 지는

〈表7〉 電力系統에 파급되는 주파수 강하영향

날짜	시 간	상 황	계통Frequency변동
4. 1	16 : 37	Net Load Trip Test (# 6)	0.8 Hz (K 5)
4. 1	12 : 22	# 6 Trip	0.6 Hz (K 5)
8.28	15 : 51	태풍으로 # 6 Trip (5호기 Over haul)	0.75Hz(K 1)

振動에 따른 큰 문제점이 야기되지 않음을 확인 할 수 있었으며, 또한 運轉技法에 있어서는 현재 개발된 특정 부하추중운전기법을 선정하여 시도하기 보다는 爐心을 안전하게 운전하기 위해 복합적인 방법을 시도함으로써 本試驗을 성공리에 수행하는데 그 의미를 두는 바이며, 장기적 안목으로 볼때는 發電所에 가장 적합한 새로운 運轉技法을 開發, Modeling할 수 있는 코드(CODE)를 개발하고 적절한 Simulation을 통하여 각 발전소에 적용할 수 있고 關聯 安全性을 增加시키는 것이 가장 중요한 研究課題일 것이다.

또한 추진되는 原電의 後續機 계약시에는 보다 실제적인 부하추중운전기법 능력 및 안전성을 입증할 수 있는 의무조항이 삽입되어야 할 것으로 사료되는 바이다.