

# 世界各國의 原電負荷 追從運轉 經驗 및 運轉技術

文 燦 國

〈韓電技術研究院 原子力研究室 先任研究員〉

## I . 序 論

原子力發電 占有率 增大에 따라 系統의 부하 관리를 효율적으로 하기 위한 하나의 방법으로 일일 혹은 주말의 最大, 最低電力需要와 供給 이 균형을 유지하며, 특히 大容量 原電事故에 의한 불시정지시의 전력계통망의 안전을 고려할 필요가 있다. 특히 우리나라는 년간, 계절별 혹은 주간과 일일에 따라 電力需要의 변화폭이 심하여 부하관리에 애로점이 많으며, 점차 發電費가 저렴한 대용량 기저부하용 발전설비의 증가로 조만간에 기저부하용 발전설비용량이 일일 최저전력수요시기인 심야에 최저수요를 초과할 전망이다, 이로 인한 기저부하용 대용량 原電의 계획감발부하추종운전은 電力會社의 입장에서 原電 안전성을 고려하여 신중히 연구·검토되어야 한다.

이러한 관점에서 本稿는 원자력발전소 부하추종운전의 정의 및 유형, 즉 원자력발전소를 일일 혹은 주말의 전력수요의 변화에 따라 계획적으로 느린 속도(약0.3%/분)로 부하추종운전하는 “計劃減發負荷追從運轉(Mode-A)”과 순간순간 전력공급망의 요구에 따라 빠른 속도(약2%/분)로 부하추종운전이 가능한 “改善된 負荷追從運轉(Mode-G)”에 관해 언급하였으며, 원자력발전소 부하추종운전경험면에서는 古里 5,6號機와 靈光 7號機 시운전시험기간중 실시한 “計劃減發負荷追從運轉試驗”과 미국 Point Beach 1,2 및 Indian Point 1,2를 비롯한 다수의 原電에서의 부하추종운전시험 및 경험과 프랑스 EDF 원자력발전소의 Mode-G 부하추종운전시험 및 경험과 서독 KWU 원자력발전소의 부하추종시험에 관하여 연구·조사하였으며, 대만의 原電 부하추종 현황에 관해 간단히 설명하였다.

또한 현재 上記 언급된 國家들이 사용중이거나 개발중인 부하추종운전기법 및 전략에 관해 부하추종운전면에서 간략히 언급하였다. 즉, 本稿를 통하여 원자력발전소 부하추종운전이 전

세계적으로 어느 정도 실시되었으며, 그에 따른 제반 문제점과 개선점을 국내 부하추종운전 가능한 加壓輕水爐型 原子力發電所에 시험적용하여 向後 國內 原電 부하추종운전 필요시 활용코자 한다.

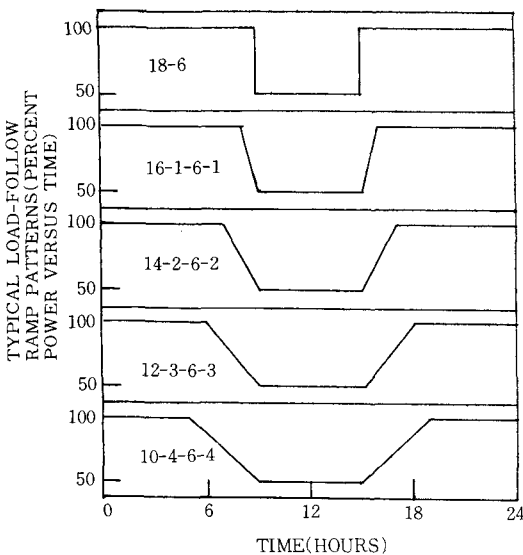
## II. 本 論

### 1. 原子力發電所 負荷追從運轉의 定義

원자력발전소 부하추종운전 유형은 다음과 같이 두가지로 크게 나눌 수 있다.

첫째는, 전체 전력공급망의 需要 및 予測에 따라 사전에 계획된대로 원자력발전소를 느린 속도로 增減發시키는 부하추종운전으로서 “계획감발부하추종운전(Mode-A)”이라 한다. 그림 1과 같이 일일 12-3-6-3시간 혹은 여러가지 유형으로 출력을 100%-70%-100%, 100%-50%-100% 등 다양한 시간과 出力變化를 일일 혹은 주단위로 사전에 계획하며, 그에 따른 原子爐物理 및 동특성분석을 하여 사전에 계획된대로 制御棒을 삽입 및 인출하고, BRS(Boron Recovery System) 및 BTRS(Born Thermal Regeneration System)를 이용하여 보론을 濃縮

〈그림 1〉 典型的 負荷追從 유형



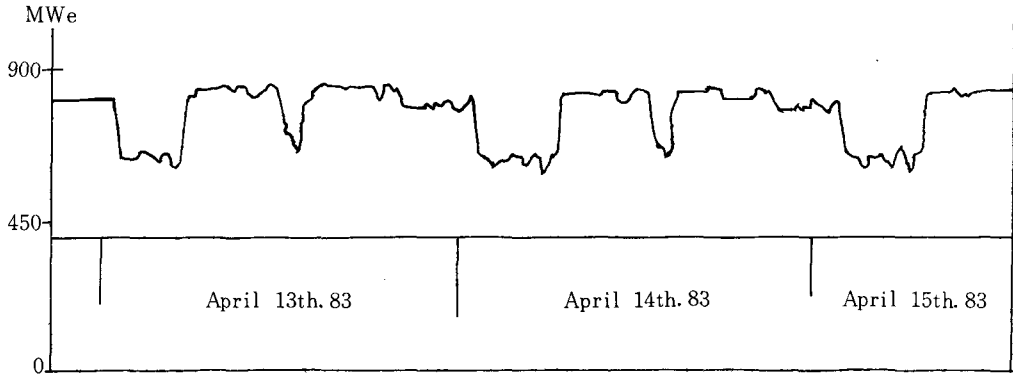
혹은 희석함으로써 原子爐 出力을 조정하는 것으로 현재까지 國內外의 경험으로는 거의 문제점이 없는 것으로 알려져 있으나, 항상 運轉員이 부하추종운전절차에 숙달되어 있어야 하고 부하추종운전기간중 계속 원자로 출력 및  $\Delta I$ 를 감시하고 있어야 한다는 어려움과 감시를 소홀히할 경우에는 여러가지 문제점이 야기될 수 있으므로 현 원자력발전소 원자로제어계통으로 장기간 연속부하추종운전을 할 경우에는 더 조사·연구해야할 분야가 있다.

둘째는 火力發電所와 유사한 정도의 부하추종운전능력을 갖고 있으며 현재 원자력발전소가 담당하고 있는 基底負荷 뿐만 아니라 중간 및 尖頭負荷까지 부하추종 가능한 빠른 속도의 부하추종운전형태로서 프랑스에서 채택하고 있는 改善된 부하추종운전(Mode-G)이 그것이다. 프랑스 Framatome에서는 反應도가 작은 Gray Rod(Steel Rod)를 개발하여 原子爐 出力을 Mode-A보다 넓은 $\Delta I$ ( $\phi_1 - \phi_2$ :  $\phi_1$ =노심 하단에서의 출력),  $\phi_2$ =노심 하단에서의 출력 운전영역내에서 增減發시키며 Mode-A와 마찬가지로 Xe의 진동 혹은 발산에 따른 出力分布의 불안정을 안정시킬 수 있는 Sycobor(Automated Boration/Dilution Sycocem)를 개발하여 Mode-G운전을 가능케 하였다. 프랑스 EDF는 그림2와 같이 하루 두번씩 대폭(100%-50%출력) 혹은 소폭(100%-80%출력)으로 Mode-G 부하추종운전(Double Chopped Load Follow Operation)을 시험하여 그 유용성을 확인하였다.

미국 Westinghouse社가 개발중인 RAOC(Relaxed Axial Offset Control)와 MSHIM(Mechanical Shim)으로 反應도가 Black Rod(Ag-In-Cd)보다 작다는 점에서 Framatome의 Gray Rod와 유사점이 있음)의 기능 또한 이와 비슷하다.

2. 原子力發電所 負荷追從運轉의 必要性 및 배경  
이에 관해서는 정립된 이론이나 필연성은 없으나, 원자력발전소 設備比率이 약30%를 넘어

〈그림 2〉 프랑스原電 Mode-G 負荷追從運轉試驗



서면 負荷管理를 효율적으로 수행하기 위하여 원자력발전소 부하추종운전을 연구·검토하기 시작한다.

즉, 우리나라는 일일 최대, 최소전력수요차 (약3,000MWe)와 주간 및 계절별 또는 연간 최대, 최소전력수요차가 심하여 발전소 부하추종에 어려움이 있으며, 長期電源開發計劃(1986.8)에 의하면 기저부하용 대용량 발전소(원자력, LNG, 유연탄) 설비비율의 증가로(表 1 참조) 發電原價의 경감을 가져올 수 있으나, 電力供給과 需要의 균형을 유지할 수 있는 부하추종능력

은 점점 저하될 전망이다.

이에 따라 單位容量 및 設備比率이 가장 큰 원자력발전소 부하추종운전은 전력공급의 입장에서는 효율적인 부하관리와 전력공급망의 安全 및 安定을 기할 수 있으며, 일일 심야최저수요시 불시사고로 인한 대용량 원자력발전소(900 MWe급)의 정지로 인하여 야기되는 전체 전력공급망의 안정도와 안전도에 미치는 치명적 위험을 제거할 수 있으며, 良質의 전력공급을 이룰 수 있다는 점에서 신중히 검토 및 고려되어야 한다. 한편 대용량 원자력발전소의 부하추

〈表 1〉 국내 발전설비(장기전원개발계획(1986.8) 참조) 및 수요예측(장기전력수요예측(1985.12) 참조)

년 도	침두 및 중간부하용			기 저 부 하 용			계	공급능력	최대수요	최저수요
	수 력	석 유	무연탄	유연탄	LNG	원자력				
1985	2,223	6,648	1,020	2,680	700	2,866	16,137	12,276		
	13.8	41.2	6.3	16.6	4.3	17.8				
1986	2,223	4,820	1,050	2,680	2,550	4,766	18,059	13,821	10,213	4,136 (3,706)*
	12.3	26.7	5.7	14.8	14.1	26.4				
1988	2,346	4,820	1,020	2,680	2,550	6,666	20,082	16,598	11,739	4,755
	11.7	24.0	5.1	13.3	12.7	33.2				
1990	2,396	4,820	900	2,680	2,550	7,616	20,962	18,314	13,442	5,444
	11.4	23.0	4.3	12.8	12.2	36.3				
1992	2,522	4,716	850	2,680	2,550	7,616	20,934	18,209	15,420	6,245
	12.0	22.5	4.1	12.8	12.2	36.4				
1994	2,612	4,451	775	4,680	2,550	7,616	22,684	19,649	17,635	7,142
	11.5	19.6	3.4	20.6	11.3	33.6				
1996	3,212	3,756	725	6,180	2,300	9,416	25,589	22,425	20,124	8,150
	12.6	14.7	2.8	24.1	9.0	36.8				

[註] 최저수요는 양수동력 불포함, ( )\*는 '86년 2월 9일 16:00의 최저수요, 연도별 윗단위는 MWe, 밑단위는 구성비율(%)

중운전 불가시 일정기간 低出力運轉을 검토할 수도 있으나, 이로 인해 經濟的 손실과 利用率 저하를 초래할 수 있으리라 간주된다. 이와 같은 관점에서 프랑스, 대만, 미국의 현황을 우리나라와 비교·분석하였다.

가. 프 랑 스

프랑스 유일의 電力會社인 EDF는 현재 900 MWe급과 1,300MWe급의 加壓輕水 爐型 標準原子力發電所(CP 1, CP 3)를 運轉, 建設 또는 計劃中이며 원자력발전비율은 점점 증가될 전망이다.

EDF는 1975년부터 原子力發電比率의 증가를 예측하고 Framatome과 공동으로 원자력발전소의 부하추종능력에 관해 연구를 시작하였으며, 초기에는 주로 기존 가압경수로형 원자력발전소의 부하추종운전형식인 Mode-A에 관해 연구하였으나, 다음과 같은 문제점들이 발생하여 원자력발전소의 신속한 부하추종운전능력 및 주파수제어기능까지 갖춘 Mode-G를 개발하기에 이르렀다.

- 문제점 : 1) 느린 부하추종운전 속도(0.3%/분)  
 2) 70% EOL(End of Cycle Life) 까지 부하추종 가능.  
 3) 좁은 ΔI운전허용범위로 인한 부하추종운전 곤란.  
 4) 잦은 BRS사용에 따른 Evaporator 및 저장탱크용량 초과 및 그에 따른 폐기물 발생.  
 5) 주파수제어기간중 ΔI운전허용범위(±5%)내 ΔI운전 곤란 등.

그러나 이와 같은 문제점들은 느린 計劃減發負荷追從運轉(例: 일일 12-3-6-3시간, 100%-50%-100% 出力變化)에는 큰 문제가 되지 않으며 Mode-A를 發展시켜 운전여유도를 확대하는 것도 가능하다. EDF는 Mode-G 및 Gray Rod를 開發하여 上記 문제점들을 해결하였으며 부하추종운전에 대한 이론 및 實証試驗을 끝내고 1983년5

월 원자력발전소 부하추종운전에 관한 認許可를 획득후 대부분의 원자력발전소가 Mode-G 부하추종운전이 가능토록 하였다. (“1985.12 기준 프랑스 EDF 원자력발전사업현황”(表 2, 3, 4) 참고).

나. 대 만

대만전력은 현재 原子力發電所 設備比率이 약

〈表 2〉 爐型別 原電

爐 型	基 數
PWR	37(900MWe급 : 32, 1,300 MWe급 : 5)
GCR	4
FBR	1
Heavy Water	1
計	43

〈表 3〉 電力生産量 分布

발전설비	백 분 율(%)
원 자 력	65
석 탄	12
기 름	2
기 타	2
수 력	19
計	100(329TWH)

〈表 4〉 發電設備容量 分布

발전설비	백 분 율(%)
원 자 력	43
석 탄	17
기 름	12
기 타	3
수 력	25
計	100(87,000 MWe)

30%를 초과하고 있으며 1983년2월부터 5월까지 4개월간 원자력발전소 4기(3,242MWe)의 100%-70%-100% 出力變化의 부하추종운전과 70%-80% 低出力運轉을 경제적인 측면에서 비교·연구한 결과 부하추종이 약\$4,500만 이익이나 부하추종운전에 관한 안전성 증명과 경험이 없으므로 저출력운전이 채택되었으며, 현재 원자력발전소 부하추종에 대한 연구가 진행중인 것으로 알려져 있다.

다. 미 국

미국은 원자력발전소 설비비율이 불과 10% 안팎으로 미국 전체적으로는 원자력발전소 부하추중운전의 필요성이 없으나, 몇몇 원자력발전소 설비비율이 높은 電力會社는 봄, 가을에 일일 혹은 주말을 이용하여 원자력발전소를 부하추중운전하며, 부분적으로 발전소의 부하추중운전능력 및 그에 따른 爐心安全度 및 核燃料健全性を 측정하기 위하여 Westinghouse 제작 원자력발전소와 B&W 원자력발전소를 사전에 계획 및 분석된대로 CAOC(Constant Axial Offset Control)기법아래 부하추중운전시험하고 요즘은 Westinghouse社가 새로이 開發中인 RAOC(Relaxed Axial Offset Control)기법 및 MSHIM(Mechanical Shim)을 이용한 부하추중운전시험을 시도하기도 한다.

라. 한 국

우리나라의 전체 발전설비에 대한 원자력발전소 설비비율은 프랑스, 대만, 미국과 같이 매년 증가 추세에 있어(表1,5 참조), 1987년 초부터 原電設備容量이 最低需要를 초과할 전망이다. 1990년대에는 중간부하 및 첨두부하를 담당할 수력, 석유 및 무연탄 발전설비비율이 40%를 하회하고 상대적으로 기저부하용 대단위 용량의 발전설비(원자력, 유연탄, LNG)비율이 증가함에 따라 전체 전력공급측면에서 수요를 충족할 수 있는 능력은 점점 저하될 것이다.

더구나 國民總生産 및 生活水準의 향상으로 일일, 주간, 계절별 혹은 연간 최대 및 최소 전력수요차의 폭이 점점 심화될 전망이어서 전체 전력공급망의 부하추중능력은 더욱 악화될 전망이다.

특히 우리나라는

〈表 5〉  
原電設備 比率(%)

國名 年度	한 국	프랑스	대만	미국
1982	12.3	32.2	27.3	9.5
1984	13.5	39.0	32.4	
1985	17.8	40.0	37.4	11.1
1990	36.3	51.6		14.2

- 1) 原電發電團地 및 대단위 발전소가 영, 호남과 강원도에 편중되어 있고
- 2) 각종 대단위 전력수용가가 많으며
- 3) 상대적으로 전체 전력수요는 적으므로
- 4) 주파수 변동율이 상대적으로 크고
- 5) 필수 기동 발전소를 고려해야하고
- 6) 전력계통망이 우리나라에 국한되어 있는 것을 감안하면(프랑스의 경우 전력계통망이 인접 유럽諸國과 연결되어 있음)

앞에서 언급한 바와 같이 일일, 주말 및 공휴일의 최저부하시기에 대응량 발전소의 計劃減發負荷追從運轉 혹은 低出力은 면밀히 연구, 검토되어야 한다. 특히, 최저전력수요시 단위대형계통사고가 발생할때 전체 전력공급망에 미치는 영향은 상당히 심각할 것으로 예측된다. (例: 1987년 최저수요예측은 4,448MWe이며, KNU-5, 6, 7, 8, 9, 10모두 900MWe급).

3. 全世界의 原子力發電所 負荷追從運轉記錄

현재까지 수집된 자료는 미국 SMSC(S.M. Stoller Co.)가 조사한 美國内外의 원자력발전소의 부하추중시험 및 상업용 부하추중운전기록, 프랑스 EDF의 Tricastin 3, Tricastin 4 원자력발전소의 Mode-G 부하추중운전기록, 서독 KWU의 1,300MWe급 가압경수로형 원자로의 부하추중운전경험 및 國內 古里5, 6號機와 영광7호기의 試運轉期間中 실시한 계획감발부하추중운전시험기록 등이다.

本稿에서는 가압경수로형 원자력발전소의 부하추중운전에만 국한되어 있으며, 비등수형 경수로(BWR) 및 중수형 원자력발전소(CANDU)도 부하추중운전시험한 기록이 있으나 언급하지 않았다. 국가별 조사·분석된 원자력발전소 부하추중운전현황은 다음과 같다.

가. 미 국

미국내 원자력발전소의 부하추중운전은 초기에 부하추중운전시험 및 시범을 미리 치밀하게 계획하여 계획감발부하추중운전에 따른 熱出力

尖頭係數(Fq), AO(Axial Offset :  $\phi_T - \phi_B / \phi_T + \phi_B$ ), 보론농도, 제어봉 삽입 및 인출 등을 負荷追從解析電算시스템을 사용하여 계산한후 시행하였거나 試驗値를 철저히 사후 분석하여 특정한 부하추종운전유형이 기술지침서의 안전 제한치를 위반하는 가를 확인·시험하였다. 또한 長期間 혹은 연속적인 부하추종운전에 따라 I-131 및 I-133의 농도를 일정기간 간격으로 측정하여 핵연료 손상여부를 파악토록 하였다.

지금까지 부하추종운전시험을 실시한 대부분의 원자력발전소(2, 3, 4-Loop)는 Westinghouse 공급이며 주로 CAOC, Mode-A기법아래 시행되었다. 또한 상업용 부하추종운전을 실시한 원자력발전소는 많지 않으나, 대표적인 원자력 발전소는 Point Beach 1, 2와 Prairie Island 1, 2로서 전체적으로 약1,500회 이상의 부하추종운전을 실시하였는데, 이것은 장기간(1971년 이후 최근까지)에 걸쳐 실시한 부하추종운전실적이다. 부하추종시험 및 시범을 실시한 대부분의 원자력발전소들은 Westinghouse社 공급 원자력발전소들이다.

일반적으로 주간부하추종운전은 주말을 이용하여 出力을 減發시키며, 일일부하추종운전에 비하여 상당히 느린 부하추종속도와 이로 인해 燃料 燃燒度에 關係없이 실시할 수 있는 것으로 알려져 있다. 부하추종운전으로 인한 핵연료 손상은 요오드(I) 및 베타 방사능( $\beta$ -activity)을 부하추종기간중, 혹은 전후에 측정함으로써 별다른 이상이 없다는 것이 밝혀졌으나, 장기간 부하추종운전으로 인하여 Point Beach 원자력발전소에서 나타난 핵연료봉 휨 현상(특히 제어봉 D근처)은 PCI(Pellet-Clad Interaction) 현상에 기인한 것이나 부하추종운전에 의해 더욱 악화된 것으로 유추되었다.

추가로 Westinghouse는 장기간 연속 일일부하추종운전시 제어봉(D-Bank)의 계속적인 움

직임에 따른 마모한계를 최소 10년으로 계산하였다. 이 경우 같은 그룹의 D-Bank가 계속 움직이는 것으로 가정하였다. 表6, 7은 미국내 원자력발전소의 부하추종운전시험 및 상업용 부

〈表6〉美國內 原電 負荷追從運轉試驗記錄

발전소명	출력 (MWt)	부하추종시험 회수및(년도)	$\Delta I$ (%) 운전범위	핵연료 주기	부하추종 속도(%/분) 및 출력변화(%)
Point Beach 1	1519	5 (1971)	+12, -20	BOL	1.1 85~40
Indian Point 2	2758	6 (1974)	+5, -5	BOL	0.3 100~50
Surry 2	2441	1 (1975)	+6, -9	BOL	0.3 100~50
D. C. Cook 1	3250	6 (1975~1977)	+6, -9	EOL	0.4 85~35
Trojan	3411	6 (1976~1977)	+5, -5	BOL	0.3 90~40
Beaver Valley	2652	3 (1977)		MOL	0.3 90~40
Salem 1	3338	(1977)		BOL	200( $\pm 10\%$ Step 변화)
McGuire	3411	5 (1983)		EOL	0.2~0.3 92~50
Oconee 1	2568	2 (1973)		BOL	2~5 95~30
Rancho Seco	2772	1 (1975)		BOL	

\* Oconee 1과 Rancho Seco는 B & W 제작원자로이며 나머지는 모두 Westinghouse제작 원자로임.

〈表7〉美國內 商業用 負荷追從運轉記錄

발전소명	부하추종 운전횟수	연 도	$\Delta I$ (%) 운전범위	부하추종 운전속도 (%/분)	출력범위 (%)
Point Beach 1	560	1971~1977	+6, -9	0.4	100~50
	10	1978~1979		0.2	100~50
	10	1984~1985		0.2	100~70
Point Beach 2	620	1973~1978	+6, -9	0.3~0.4	100~40
	10	1978		0.2	100~65
	20	1984~1985		0.2	100~60
Prairie Island 1	50	1973~1978	+5, -5	0.3	100~50
	40	1978		0.2	100~40
	10	1983		0.2	100~50
Prairie Island 2	95	1974~1977	+5, -5	0.3	100~50
	60	1978		0.2	100~40
	20	1982		0.2	100~60
Zion 1	15 (weekly)	1977	+6, -9	0.03	100~50
D. C. Cook	25 (weekly)	1977	+5, -5	0.02 0.04	100~40
	15	1975		0.3	90~30
Rancho Seco	15	1975		0.2	70~50
	15	1978		0.2	70~50

하추중운전실적을 나타내었다.

나. 프 랑 스

프랑스는 상업용 원자력발전소 부하추중시험 및 운전을 수행하기 전에 核燃料다발, CRDM (Control Rod Drive Mechanism) 및 제어봉에 관해 實驗爐에서 實証試驗을 거쳤으며, Mode-G 부하추중운전절차서의 개발 및 검증을 위하여 1981년부터 1984년까지 Tricastin2와 3 원자력 발전소(900MWe급)에서 부하추중시험이 주파수제어까지 겸하여 실시되었다. 또한 Mode-G 부하추중시험 기간중 Sycobor(Automated Boration/Dilution System)에 대한 시험도 ΔI제어와 보론농축 및 희석면에서 성공적으로 수행되었다.

프랑스의 EDF는 1983년 1월 1일부터 1984년 7월 31일까지 일일부하추중운전과 원격주파수제어를 병행하여 2,000회 넘게 실시하였다 하며(이중 Tricastin2와 3도 250에서 300회 실시), 210개의 프랑스 設計 "17×17" 핵연료다발이 250회 이상 부하추중시험을 수행하고, 같은 기간동안 9개 核週期에 1,000시간 이상, 1개 核週期에 5,000시간 이상 주파수제어운전을 하였다.

上記 시험결과 부하추중과 주파수제어가 핵연료 손상에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 알려졌으며, 핵연료다발의 침식이나 부식에도 큰 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다. 1985년 5월 기준 900MWe급 원자력발전소 10기를 Mode-G 부하추중운전중이며, 負荷追從運轉實績은 80 원자로·개월이다(表 8 참조).

〈表 8〉 프랑스 負荷追從運轉記錄

발전소명	출력 (MWt)	부하추중 운전기간	출력범위 (%)	부하추중 운전기법	속 도 (%/분)
Tricastin2	2785	1984	95-53	Mode-G	5.5
Tricastin3	2785	1981~1983	100-50	Mode-G	2.2
Tricastin4	2785	1981~1986	110-50	Mode-G	2.2
기타 다수		1976~1984		CAOC Mode-G	

○ Mode-G 개발추진경위

- 1975년 : 개발 착수
- 1981년 10월 : Prototype Hardware 실험
- 1982년 11월 : 확정된 Hardware 시험 및 운전절차서 작성
- 1983년 3월 : 실증운전 시행
- 1983년 5월 : 원자력발전소 Mode-G 부하추중운전허가 획득
- 1984년 10월 : 부하추중운전+ 출력부극운전(Spinning Reserve)+주파수제어운전(Frequency Control)의 실증운전 시행

다. 서 독

서독 KWU 제작 원자력발전소는 부하추중운전 시험을 거의 대부분 試運轉期間(1973년~1985년)中 실시하였는데, 주목적은 다양한 출력부극능력을 KWU가 개발한 Overlapping Control Bank Mode를 이용하여 시험하는데 있었다. 上記 Mode의 특징은 보론濃度を 변화시키지 않고 빠른 출력부극을 가능케 하는데 있으며, 모든 시험은 Biblis-A 원자력발전소를(1975년 시험) 제외하고는 성공적으로 수행되었다(表 9 참조).

KWU 역시 현재까지는 핵연료 손상을 발견치 못했으나, 급속한 出力增加로 인하여 PCI 야기 가능한 尖端出力은 KWU 부하추중기법에

〈表 9〉 西獨 負荷追從運轉記錄

발전소명	출력 (MWt)	부하추중 운전횟수	연 도	속 도 (%/분)	출력범위
Boissele	1365	12	1973		100-50, 80
Biblis A	3517	3	1975	5.5	100-60
Biblis B	3517	1	1977	0.6~5	100-45
Grafenheinfeld	3765	3	1982	10 5 1.5	90-70 95-35 90-20
Grohnde	3765	1	1985	5.5	100-30
Phillipsburg	3765	10	1985	1.2~5	100-45
Unterwieser	3733	248 ('85만)	1982~1986	5.5	100-50
Stade	1892		1984~1985	0.3	95-60

의해 정상부하추중운전시 발생하는 침두출력의 3~5배는 될 것으로 예측된다.

부하추중운전기록면에서는 1984년 8월까지 1,300일이 넘게 주파수제어운전을 하였으며, 1983년에는 650회의 실적이 있다. KWH 1,300M WH급 원자력발전소는 1974년초 이후로 다음과 같은 부하추중능력을 반복적으로 확증·시험하였다 한다.

8%  $\frac{60\%}{\text{분}}$  23%  $\frac{10\%}{\text{분}}$  55%  $\frac{5\%}{\text{분}}$  80%  $\frac{2\%}{\text{분}}$  100%

라. 한 국

국내 원자력발전소 負荷追從試驗은 시운전기 간중 실시되고 있으며, 국내에는 현재까지 원자력발전소를 상업용으로 부하추중운전한 기록은 없다. 국내 부하추중운전시험은 古里 5, 6호기와 영광 7호기에서 실시되었다. 3基 모두 計劃減發負荷追從運轉의 가장 기본적인 유형인 일일 12-3-6-3시간에 100%-50%-100%出力變化를 시험하였는데, 고리 5, 6호기는 制御棒 수동, 영광 7호기는 제어봉을 자동으로 설정하여 놓고 시험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 古里 5호기 負荷追從運轉試驗: 1985년 9월 22일과 23일 양일간에 걸쳐 부하추중운전을 약 "0.3%/분"의 출력증감발속도로 일일 12-3-6-3時間의 100%-50%-100%出力變化로 첫날은 MINB(Minimum Boration)전략과 둘째날은 SPINR(Spinning Reserve)전략으로 운전하였다. 이상적인 MINB와 SPINR과는 일치되지 않았으나, 국내 최초로 이틀간 부하추중운전을 안전하게 성공적으로 수행하였다는 사실에 의미가 있다.

가) 첫날 MINB부하추중운전: 부하추중운전실시 24시간 혹은 36시간전부터  $\Delta I$ 를 안정시켜 Xe평형상태 및 제어봉을 거의 인출한 상태에서  $\Delta I$ 목표치(-4.5%)를 설정한후 100%출력에서 약0.3%/분의 속도로 出力을 減發시

상쇄키 위하여  $\Delta I$ 가 양의 상한치에 거의 도달할때까지 제어봉을 인출한다. 이 경우 보론희석에 의해 제어봉이 완전 인출되어  $\Delta I$ 가 양의 상한치를 벗어나는 것을 경계하여야 한다. 부하키기 시작한다. 이 경우 처음 출력결손에 의한 正反應度가 Xe형성에 의한 부반응도보다 크므로 정반응도를 제어봉D를 삽입시킴으로서 상쇄시켜야 하나, 이 시험의 경우 초기에 보론濃縮을 하였으므로 제어봉의 삽입이 보론농축에 의한 부반응도 때문에 깊이 삽입되지 않았으며, 초기 과다 보론농축 및 爐心下部에 보론농도 과밀화에 따라 노심하부의 中性子束이 감소되어  $\Delta I$ 가 양의 상한치로 이동하는 현상을 나타내었다.

출력이 약60%쯤 도달하였을때 과다한 보론희석에 의해 제어봉이 급속히 깊이 삽입되었으며, 이로 인해  $\Delta I$ 가 음의 하한치로 이동하기 시작하였다. 즉, 출력감발 초기의 보론농축 과다와 50% 출력 도달시의 과다 보론희석으로 인하여 MINB技法에 의한 전형적인  $\Delta I$  움직임과 상반되는  $\Delta I$ 궤적을 생산하였다.

즉, 이상적인 MINB는 고리 5호기 경우 出力減發時의正反應度を 상쇄토록 제어봉 삽입에 의해  $\Delta I$ 가 거의 음의 하한치에 도달할때까지 거의 대부분 제어봉에 의해 반응도를 조정하며, 50% 출력 도달후 Xe형성으로 인한 부반응도를 추중운전기간중 출력증감발에 따른 보론희석과 농축은 부하추중시험전에 정확한 반응도 계산을 수행하여 과다한 보론농축과 희석으로 인한 과다 보론희석 방출량을 피하여야 한다. 出力增加(50%→100%)時 본 시험의 경우 초기 출력감발시 출력분포( $\Delta I$ )가 양의 방향으로 치우치는 경향이 있으므로 제어봉을 인출시킴과 동시에 보론농축을 수행하여  $\Delta I$ 가 양의 방향으로 이동케하였다.

나) 둘째날 SPINR부하추중운전: 이론적으로는 처음 출력감발시에는 약85% 出力까지



보론농축에 의해 제어봉을 인출하여  $\Delta I$ 를 양의 상한치 방향으로 이동시킨후 50% 출력까지 제어봉 삽입만으로 정반응도를 상쇄시키고, 50% 출력 도달후 Xe형성을 보론회석으로 상쇄시키면서 제어봉을 깊숙히 삽입하여  $\Delta I$ 를 음의 하한치 근처에서 유지시키며, 出力增加時 제어봉 인출로 부반응도를 보상시켜야 한다. 그러나 전날과 마찬가지로 보론농축 및 회석량이 적절하지 않았으며, 보론농축 및 회석의 反應度 予測을 정확히 하기 위해서는 정확한 負荷追從解析電算코드가 필요하다.

2) 古里 6號機 부하추중운전시험 : 1986년 4월 4일과 5일 양일간에 걸쳐 고리 5호기와 동일한 기법(CAOC,  $\Delta I \pm 5\%$ ) 및 유형(일일 12-3-6-3 시간, 100%-50%-100% 출력변화)으로 부하추중운전시험을 실시하였다. 첫날, 둘째날 모두 SPINR전략을 구사하여 보았으나 초기 출력감발시 과도한 보론농축과 이를 상쇄키 위한 과도한 보론회석으로 결과적으로 과도한 보론회석 방출량을 생산하였으며, 제어봉은 MINB전략을 사용할때와 유사한 200에서 130까지 삽입되었다. 그러나 고리 5호기와 초기에  $\Delta I$ 가 양의 상한치로 이동하였다는 사실이 비슷하며, 그 주된 이유는 爐心下部의 보론농도 과밀도로 인한 노심하부 中性子束의 감소와 그에 따라  $\Delta I$ 가 양의 상한치로 이동하였고 유추시켜 볼 수 있다.

출력이 50%에 도달한후 Xe형성으로 인한 부반응도를 보론회석으로 상쇄시켜주어야 하나, 이 또한 과도한 보론회석으로 제어봉D를 약100까지 삽입케 되어 결과적으로  $\Delta I$ 가 음의 하한치에 접근케 되었다. 50%출력도달후 약3~4시간후 부터 Xe형성이 최고점을 지나 붕괴하기 시작함에 따라, 이로 인한 正反應度 생성을 보론농축으로 상쇄시켜 음의 하한치 근처에  $\Delta I$ 를 유지시키면서 가능한 제어봉을 깊이 삽입시키는 것이 좋다. 그러나 제어봉 삽입이 보론농

축이 爐心内 균일하게 분포됨에 따라 점점  $\Delta I$ 가 음의 하한치로 접근함에 영향을 미치므로 본 시험에서와 같이 다소 과다 보론농축으로 제어봉을 인출할 필요가 있다. 이 또한 시험에 의해서 처음 발견된 문제점들이다.

50%에서 出力增加時 Xe붕괴로 인한 正反應度 보다 출력결손에 의한 부반응도의 절대값이 크므로 반응도차를 제어봉 인출에 의하여 보상하여야 하나, 이번 시험의 경우 불필요하고 과도한 보론농축으로 제어봉 인출이 급속히 이루어졌으며, 출력증가에 필요한 정반응도를 구하지 못하여 출력증가가 약 1시간 지연되었다. 즉, 이 경우 BRS 혹은 BTRS를 이용한 보론회석(약50PCM)을 약간 병용하였다면 제어봉 인출에 의해 충분한 정반응도를 얻었을 수 있었을 것이다.

둘째날 부하추중운전시험은 BTRS사용에 運轉員들이 익숙하여진 관계로 보다 원활하게 수행하였으며, 첫날에 비해 과다 보론회석 및 농축 현상도 현저히 줄어들어 BTRS와 제어봉을 병용하여 SPINR 전략으로 부하추중운전하였다(첫날 보론농도차  $BB_c = 82\text{ppm}$ , 둘째날 보론농도차  $\Delta B_c = 55\text{ppm}$ ).

3) 영광 7호기 부하추중운전시험 : 1986년 8월 9일과 10일 양일에 걸쳐 고리 5, 6호기와 동일한 기법(CAOC) 및 유형(일일 12-3-6-3 시간, 100%-50%-100% 출력변화)으로 부하추중운전시험을 수행하였다. 영광 7호기는 고리 5, 6호기와는 달리 음의 하한치쪽으로 약간 넓은 운전영역( $\Delta I$ 목표치 =  $-1.34\% + 3\%$ ,  $-9\%$ )을 설정하여 놓고 2次側 터빈出力을 따르게 하였다.

본 부하추중운전시험은 고리 5, 6호기와 核設計, 核燃料(OFA : Optimum Fuel Assembly) 및 爐心燃燒度도 다르고 초기 출력감발시 출력결손에 의한 正反應度가 Xe형성에 의한 부반응도를 초과하므로 제어봉 삽입에 의해 정반응도

를 상쇄시켜야 하나, 보론농축에 의한 제어봉 인출과 초기 Xe평형이 이루어지지 않은 상태였으므로  $\Delta I$ 가 양의 상한치로 급히 이동하여 75% 출력에서 약5분간  $\Delta I$ 운전범위를 벗어났다. 즉, 100%出力에서 50%出力까지 감발시 출력결손에 의한 정반응도(+434PCM)가 Xe형성에 의한 부반응도(-505PCM)보다 작아 이 기간중 약+70PCM의 정반응도를 보상해야 된다는 계산이 본 실험에 의해 밝혀졌으며, 그에 따라 고리 5, 6호기 부하추중시험때와는 달리 출력감발시(75%→50%출력) 보론희석에 의해 제어봉을 삽입시킴으로써  $\Delta I$ 를 운전범위내에 유지시켰다.

본 부하추중에 따른 원자로 출력증감발이 제어봉 자동상태에서 수행되었으므로 출력변화와 Xe형성 및 붕괴에 따라 반응도를 조정하기 위하여 제어봉이 수시로 삽입 및 인출되었으므로  $\Delta I$ 와 제어봉의 움직임이 고리 5, 6호기 시험 때 보다 무척 빠른 주기로 진동하는 양상을 보여주었다.

본 부하추중시험은 사전에 Xe Follow 및 Xe Prediction 電算코드로 계산한 反應度 分析에 의해 예상된대로 부하추중을 실시하였으므로 다한 보론농축 및 희석은 전반적으로 없었으나, 처음 시험을 시작할때 Xe형성에 따른 부반응도 값의 과소 예측과 보론 초기농축에 의해 약간

과다 희석방출량이 발생하였다.

출력감발(100%→50% 출력) 완료후 Xe형성에 따른 부반응도를 상쇄시키기 위하여 보론의 지속적인 희석이 수행되었으며, 출력증가(50%→100% 출력)시 Xe붕괴에 따른 正反應도가 출력결손에 의한 부반응도를 초과하므로 이를 상쇄시키기 위하여 보론농축을 실시하였으며, 제어봉은 거의 일정 범위에서 진동토록 하였다.

첫날 부하추중운전은 Xe分布가 다소 不安定하고 보론농축을 거의 시키지 않은 상태였으므로, 제어봉의 인출에도 불구하고 출력감발 완료 직후부터 약15시간동안  $\Delta I$ 와 제어봉D의 움직임이 상반되는 결과를 보여주었다.

그러나 둘째날은 爐心이 보다 안정된 상태였으므로 제어봉의 움직임에 따라 예측된대로  $\Delta I$ 가 민감하게 반응하는 현상을 보여주었으며, 부하추중운전경험축적에 따라 보론희석 방출량은 점점 감소되는 추세를 보여주었다(表10, 11 참조).

### III. 結 論

國內 電力需要는 일일, 주간, 계절 및 연간을 통한 최대, 최저 수요차가 심하며, 이러한 경향은 國民生活이 先進國化됨에 따라 점차 심화될 추세이다.

發電設備側面에서는 經濟的이고 發電單價가 저렴한 기저부하용 대용량 발전설비 점유율이

表10 國內 原電 負荷追從運轉試驗記錄

발전소명	일자	최대 $\Delta I$ 최소 $\Delta I$	$\Delta I$ 운전범위 및 (목표치)	증감발속도 및 출력	보론 농도 최대, 최소	보론희석량
KNU-5	1985. 9. 22	+1.5(%) -9.5	+5, -5(%) (-4.5)	0.3(%) 100-50(%)	753, 682 (ppm)	20,000L/DAY BRS만 사용
	1985. 9. 23	+0.5 -6.5	+5, -5 (-4.5)	0.3 100-50	742, 690	13,460L/12Hr BRS만 사용
KNU-6	1986. 4. 4	+0.7 -7.4	+5, -5 (-4.3)	0.3 100-50	781, 723	18,500L/DAY BTRS/BRS사용
	1986. 4. 5	+2.2 -6.8	+5, -5 (-4.3)	0.3 100-50	804, 749	11,700L/DAY BTRS/BRS사용
KNU-7	1986. 8. 9	+2.59 -9.01	+3, -9 (-1.34)	0.3 100-50	896, 822	19,200L/DAY BRS만 사용
	1986. 8. 10	+1.76 -9.52	+3, -9 (-1.34)	0.3 100-50	891, 821	9,560L/DAY BTRS/BRS 사용

1980년대 말에는 약60%를 상회할 예정이며, 반면에 중간 및 첨두부하용 발전설비는 점차 감소될 전망이어서, 이로 인한 전체 발전설비의 부하추종능력은 점점 저하될 전망이다. 우리나라의 경우 기저부하용 발전설비(원자력, 유연탄, LNG등)중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 原子力發電設備는 1987년 초부터 原子力發電 單一 供給能力(원자력발전설비용량×0.85)이 年 최저수요를 넘어설 전망이며, 유연탄과 LNG 및 煤 油 火 力 發 電 所 를 합 한 다 면 기 저 부 하 용 발 전 公 급 능 력 은 계 절 에 따 라 일 일 최 대 수 요 도 초 과 할 전 망 이 다.

따라서 최저 전력수요시기에 전력수요와 공급의 균형을 유지시키기 위하여 부하추종 혹은 부하관리면에서 여러가지 해결방안이 있을 수 있으나 그 어느 것도 쉽지 않으며, 그중 하나의 가장 經濟的인 방안으로 원자력발전소 계획개발부하추종운전을 검토할 수 있다.

현재 國內에서 運轉 혹은 建設中에 있는 원자력발전소는 전세계의 대부분 원자력발전소와 마찬가지로 기저부하용 원자력발전소로 기본적으로 계획개발부하추종운전(일일 12- 3 - 6 - 3시간 ; 100%-70%-100%, 100%-50%-100%, 100%-30%-100% 출력변화기준)에 따른 안전성 검토를 설계시 반영하였으나, 실제로 상업용으로 부하추종운전한 기록은 앞에서 서술한 바와 같이 미국 및 프랑스의 몇몇 원자력발전소에 편중되어 있으며, 현재까지 조사·연구된 加壓輕水爐型 원자력발전소 부하추종시험 및 운전결과로부터 부하추종운전시 가장 우려되는

〈表 11〉 國內 原電 計劃減發負荷追從運轉能力

발전소명	평균출력 증감속도	Fq 설계치	BRS/ BTRS	부하추종운 전 가능성
KNU-1	0.05%/분	2.13	BRS	거의불가능
KNU-2	0.3%/분	2.34	BRS/BTRS	가능
KNU-5, 6, 7, 8	0.3%/분	2.32	BRS/BTRS	가능
KNU-9, 10	0.3%/분	2.35	BRS	가능
KNU-3	60%/분	?	?	?

따라서 국내 가압경수로형 원자력발전소(고리 1호기 제외)는 기본적으로 일일 계획개발부하추종운전능력을 보유하고 있다고 판단되며, 단기간의 부하추종운전 및 시험에는 안전상의 문제가 없는 것으로 분석되나, 장기간의 상업용 부하추종운전의 가능성을 확인하기 위해서는 다음과 같은 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

- 大容量(900MWe級) 원자력발전소의 일정기간(약 1년~2년) 동안 최저수요시 전 핵연료주기(약 85% EOL까지)를 통하여 국내 실정에 맞는 계획개발부하추종운전(예: 일일 16- 2 - 4-2시간에 100%-70-100% 출력변화) 시험수행 및 핵연료건전성 확인을 위한 방사능도측정.
- 보다 정밀한 부하추종 해석용 발전소 전산 코드 개발.
- 핵연료 연소도에 따른 보론회석 방출량과 BRS 및 BTRS의 능력 검토.
- 부하추종운전 절차서에 따른 운전원 훈련 및 절차서 교정.
- 최적 부하추종운전 유형 및 일정기간 저출력 운전과의 경제성 비교.
- 부하추종이 발전소 제반 계통에 미치는 영향 및 고장율 증가 등.

上記 언급한 연구들은 기존 원자력발전소를 보다 안전하게 부하추종운전하기 위하여 요구되는 것들이며, 필요하다면 核燃料 및 關 聯 原 子 爐 設 備 의 내 구 성 조 사 등 도 본 연 구 에 뒤 따 른 實 証 研 究 가 수 행 되 면 바 람 직 하 나, 가 장 근 본 적 인 대 책 은 보 다 개 량 된 부 하 추 종 능 력 을 가 진 원 자 력 발 전 소 로 개 조 혹 은 건 설 하 는 것 이 다.

結論的으로上記 제반 조건들이 만족된다면 原電設備比率의 증가에도 불구하고 전체 발전설비의 부하추종능력을 향상시킬 수 있으며, 계통망의 安全性과 安定度를 향상시키고, 良質의 전기를 공급하기 위하여 경제적이고 안전한 원자력발전소 계획개발부하추종운전을 실시할 수 있을 것이다.