

# 負荷追從運轉에 따른 運轉利用率向上 檢討

*Technical Review of Load Follow Operation in Nuclear Power Plants*



李 銀 哲

〈서울대학교 原子核工學科 教授〉

## I. 序 論

1978년 古里 1 號機 原子力發電所의 상업운전이 시작된 이래 원자력에 의한 전력공급이 점점 늘어가고 있다. 작년엔 5호기가 가동되면서 총전력생산용량에서 原子力の 점유율은 18%에 달하게 되었고 稼動電力比로는 거의 40%에 해당한다. 점유율은 1991년에는 35%에 달할 것으로 예측되어 그때에는 원자력에 의한 전력공급이 주종을 이룰 것으로 예상된다. 따라서 국내에서 負荷追從運轉을 심각하게 고려하고 있는 것은 당연한 귀결이다.

부하추종운전은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 원자력발전을 基底負荷로 하고 재래식 발전을 사용하여 부하를 따르는 것이며, 또 다른 한가지는 재래식 발전으로 基底負荷를 충당하고 원자력발전소를 負荷追從으로 운전하는 것이다. 각각의 방법이 장단점을 가지나 本稿에서는 後者를 택하여 分析하려 한다.

## II. 原子力を 이용한 負荷追從運轉

원자력의 占有率이 낮을 때에는 원자력을 基底負荷로 사용하는 것이 바람직하다. 이는 核燃料의 利用率, 연소상태와 熱效率의 측면에서

利點이 있기 때문이다. 그러나 이러한 長點들은 점유율이 높아지면 사라지게 된다. 在來式發電所 즉 火力 또는 水力을 이용한 발전소들의 가동 중지를 전제해야 하기 때문이다.

電力需要는 1日의 負荷週期를 갖게 되는데 예를 들어 晝間에는 높은 수요를 가지며 夜間에는 급격히 줄어든다. 우리나라의 경우 그 차이가 심할 경우 65%까지 달하는데 이러한 週期性 때문에 언젠가는 부하추종운전이 이루어져야 한다. 國內 原子力發電所는 고리1호기를 제외하고는 모두 부하추종운전이 가능하다. 즉 부하의 變化에 따라 出力變化가 15%에서 100%까지 자동적으로 조절될 수 있으며, 갑자기 전력이 요구될 경우 90%이상의 출력으로 즉시 회복할 수 있는 능력을 가지고 있다. 특히 Constant Axial Offset Control(CAOC)방법을 도입하여 出力分布의 찌그러짐을 막고 있으므로 이상적인 핵연료의 燃燒를 기대할 수 있으며 毒物質인 Xe의 심한 진동도 막을 수 있다.

負荷追從運轉의 分析을 위해서는 먼저 운전 에 따른 安全事故를 예방할 수 있는가를 검토하여야 하며 따라서 언제든지 安全性餘裕를 갖도록 하여야 한다.

이 여유란 核燃料熔融, 核沸騰離脫, 冷却材喪失事故와 局部 出力變化에 따른 核燃料損傷에 대한 여유를 말하며, 운전기간 동안 Condition II에 해당하는 過渡現象을 충분히 막을 수 있어야 한다. 여기에는 앞서 언급한 안전성 여유는 물론 피복재의 應力變化에 따른 파손여유까지 포함되어 있다.

이밖에도 보론을 회석하기 위해 방출된 물의 처리를 위한 Boron Recovery System(BRS)과 Boron Thermal Regeneration System(BTRS)의 능력을 검토하여야 한다. 작년 9월 고리5호기에서 부하추중운전을 시도해 본 결과 보론회석시 방출된 물의 量이 1日 기준으로 20m<sup>3</sup>를 넘지 않았다.<sup>1)</sup>

이 정도는 BRS와 BTRS로 능히 감당할 수 있으나 週期末에 가게 되면 물속에 포함된 보론의 절대량이 적기 때문에 더 많은 방출량을 갖게 되는데 주기 연소도의 약 70%에서 BTRS로 처리할 수 있는 한계에 도달할 것으로 예측된다.

### III. 負荷追從運轉 制御

부하를 추종하는 데는 여러가지 방법이 있는데 代表的인 運轉 調節方法은 세가지로 구분할 수 있다. CAOC運轉技法에서, Axial Offset(AO)의 표적치가 출력에 따라 직선적으로 변화하며 AO가 표적치로부터의 일정한 폭(band)을 벗어나게 되면 경보가 울린다. 부하추중운전에서는 出力增減時 AO가 band를 벗어나 경보가 울릴 경우 制御棒 또는 보론을 사용하여 AO band의 경계로 가져오느냐 표적치까지 가져온 후 운전을 계속하느냐에 따라 운전방법을 달리 하고 있다.

먼저, 가까운 표적치 경계로 AO를 조절할 경우 보론조절계통의 사용이 억제되며 쉽게 AO를 조절할 수 있는 利點이 있다. 이러한 운전방법을 MINB라 부르는데 短點은 제어봉으로

反應度 制御를 감당해야 하므로 出力의 급속한 過渡現象을 유발시킬 수 있다는 점이다.

두번째로 AO가 band를 벗어났을 때 표적치까지 끌어다 놓고 운전하는 CNTR이 있다. 이 운전방법은 운전자가 조절하기 쉽고 다시 AO band를 벗어나는 데까지 여유가 있는 利點이 있으나 보론조절계통을 통하여 반응도를 제어해야 하므로 방출된 물의 처리를 동시에 하여야 하고 만일 BTRS의 처리능력을 넘어서게 되면 사용할 수 없다는 短點이 있다.

또다른 운전방법은 MAXRTP인데 이것은 부하추중운전중에 만일 다른 발전소가 정지되어 급히 출력을 회복해야 할 경우에 대비한 운전방법이다. 이 경우 제어봉을 깊이 삽입하고 부수적인 반응도 제어는 보론으로 수행하는데 AO band의 兩端를 가로지르게 된다. 그러나 출력이 높은 경우에는 대개 AO band의 上限을 유지하고 약 85% 출력부터는 下限을 유지하게 되므로 앞의 두가지 운전방법의 복합방식으로 볼 수 있다. 다만 이 방법 역시 보론조절계통의 역할이 중요하고 회석시 放出量의 제한을 받는다 는 단점이 있다.

本 研究에서는 앞에 언급한 세가지 방법중에서 두가지를 택하고 핵연료 연소상태를 週期初, 週期中, 週期末을 택하여 분석을 시도하였으며, 100%출력으로부터 최저출력을 80%, 70% 그리고 50%출력까지로 세가지 경우를 각각 고려하여 모든 경우에 안정성에 위배되지 않음을 확인하였다.

### IV. 負荷追從運轉 分析

부하추중의 可能性을 검토하기 위해 본 연구에서는 1次元的 느린 과도현상 분석코드를 개발하였다. 부하추중운전 분석은 3차원 문제이기 때문에 3차원 核特性 分析코드를 도입하면 보수적인 가정을 피할 수 있어 정확성을 기할 수 있으나 3차원 계산은 엄청나게 복잡하고 계

산시간이 너무 많이 필요하기 때문에 단기간의 세밀한 분석이 필요한 경우 이외에는 적합하지 않다. 이에 비해 1차원적 가정은 모델을 적절히 선택하여 많은 경우의 분석을 가능하게 하며 정확성도 어느정도까지 유지할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 1次元的 모델을 근거로 解析코드를 개발하였다. OLFP로 命名된 이 코드에서는 최대 100개의 구간을 다룰 수 있다.

反應度制御 및 饋還모델은 Xe과 Sm을 고려하였고 제어봉의 위치, 보론농도 및 물의 밀도, 핵연료 온도변화에 따른 반응도 변화를 고려하였다. 이밖에도 부하추종운전에 따른 느린 과도 현상을 분석하기 위해 발전소 因子들의 변화를 묘사할 수 있는 모델들이 포함되었다. 즉 제어봉의 위치, 入口 流速率과 入口 冷却材 溫度 등이 고려되었다. 모든 核計算은 2群 中性子擴散方程式에 의해 계산된다.

VI-1 中性子擴散모델

각 구간 간격에서, 2群 확산방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \int J_1 ds + \int \Sigma^1 \phi^1 dv &= \frac{1}{K} \left( \int \nu \Sigma_f^1 \phi^1 av \right. \\ &\quad \left. + \int \nu \Sigma_f^2 \phi^2 dv \right) \dots\dots\dots (1) \\ \int J_2 ds + \int \Sigma^2 \phi^2 dv &= \int \Sigma_r \phi^1 dv \end{aligned} \right\}$$

기하학적으로 爐心을 작은 體積單位로 나누어 구간 平均 中性子束에 대해 풀면

$$\left. \begin{aligned} \int J_1 ds + \phi^1 \int \Sigma^1 dv \\ = \frac{1}{K} \left( \phi^1 \int \nu \Sigma_f^1 dv + \phi^2 \int \nu \Sigma_f^2 dv \right) \dots\dots\dots (2) \\ \int J_2 ds + \phi^2 \int \Sigma^2 dv = \phi^1 \int \Sigma_r dv. \end{aligned} \right\}$$

이 된다. 여기서 밀침자 f와 r은 각각 핵분열단면적과 제거단면적을 나타내며, 윗침자는 에너지 그룹을 의미한다. 윗 식을 풀기 위한 경계 조건으로 반사조건과 진공조건을 사용할 수 있다.

IV-2 核燃燒모델

시간 간격당 平均 燃燒度增加가 ΔBU로 주어질때, 구간 n에 주어진 핵연료의 연소도는

$$BU_n(t) = BU_n(t_0) + P_n(t_0) \cdot \Delta BU \dots\dots\dots (3)$$

이 되며 출력은

$$P_n(t_0) = K \Sigma_f^1 \phi_n^1 + K \Sigma_f^2 \phi_n^2$$

로 규격화된다. 이때 t<sub>0</sub>는 연소계산이 시작되는 시간이다. 실제로 핵연료의 연소는 중성자속에 대한 반복 계산이 행해지기 전에 일어나므로 계산에 사용된 중성자속은 먼저의 분석결과 또는 직전의 시간 간격에서 계산된 값들을 사용한다.

IV-3 毒物質計算모델

毒物質核種의 數密度 計算은 정해진 시간 간격동안에 爐心 出力準位, 出力分布와 단면적 등이 변하지 않는다는 가정하에 이루어진다.

$$I(t) = I_0 \exp(-\lambda_1 \Delta t + \frac{Y_1 \Sigma_f^1 \phi}{\lambda_1} [1 - \exp(-\lambda_1 \Delta t)])$$

$$\begin{aligned} X(t) &= X_0 \exp[-(\lambda_x + \sigma_x^a \phi) \Delta t] \\ &\quad + \left[ \frac{(Y_1 + Y_x) \Sigma_f^1 \phi}{\lambda_x + \sigma_x^a \phi} \right] \times [1 - \exp\{-(\lambda_x \\ &\quad + \sigma_x^a \phi) \Delta t\}] + \left[ \frac{\lambda_1 I_0 - Y_1 \Sigma_f^1 \phi}{\lambda_x + \sigma_x^a \phi - \lambda_1} \right] \times \\ &\quad [\exp(-\lambda_1 \Delta t) - \exp\{-(\lambda_x + \sigma_x^a \phi) \Delta t\}] \end{aligned}$$

$$P(t) = P_0 \exp(-\lambda_p \Delta t) + \frac{Y_p \Sigma_f^1 \phi}{\lambda_p} \times [1 - \exp(-\lambda_p \Delta t)]$$

$$\begin{aligned} S(t) &= S_0 \exp(-\sigma_s^a \phi \Delta t) + \frac{Y_p \Sigma_f^1 \phi}{\sigma_s^a \phi} \times \\ &\quad [1 - \exp(-\sigma_s^a \phi \Delta t)] + \left[ \frac{\lambda_p P_0 - Y_p \Sigma_f^1 \phi}{\sigma_s^a \phi - \lambda_p} \right] \\ &\quad [\exp(-\lambda_p \Delta t) - \exp(-\sigma_s^a \phi \Delta t)] \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

여기서 대문자 I, X, P와 S는 각각 I-135, Xe-135, Pm-149와 Sm-149의 數密度를 나타내며 λ와 Y는 붕괴상수와 核分裂收率을 의미한다.

독물질의 연소과정에서 theta differencing scheme이 도입되는데 이것은 어떤 시간 간격 Δt 동안 Xe의 연소를 두단계로 나누어 고려하는 것이다. 즉 (1-Q)Δt 동안에는 시간 간격의 초기 중성자속 분포를 사용하여 연소시키고, 나머지 시간 간격 Q·Δt 동안에는 새로운 중성자속 분포를 추정하여 반복계산에 의해 연소시킨다. 문헌에 의하면 1시간보다 짧은 시간 간격

에서 적합한 Q값은 0.4에서 0.5 정도로 알려져 있다.

#### IV-4 기타 모델들

앞에서 언급한 모델 외에도 물의 密度計算에는 전체enthalpy상승 모델, Subcooling모델 또는 DNBR모델을 사용한다. 핵연료의 온도는 DDID코드<sup>2)</sup>에 도입된 MUDRA모델을 그대로 적용하였는데, 이 모델에는 核燃料素子内에서 반경방향으로 출력과 온도분포를 결정하는 것과 핵연료소자와 피복재 사이의 열팽창을 계산하는 모델이 포함되어 있다. 분석에 사용한 材料特性들은 MATPRO-Version 10<sup>3)</sup>으로부터 택하였다.

#### V. 分析 結果

각 구간에서의 有効 2群斷面積들은 2차원과 3차원 核特性分析을 통하여 얻었다. 기본적인 核資料는 KICC코드<sup>4)</sup>로부터 얻었으며 이를 2차원과 3차원 코드인 KIDD<sup>5)</sup>와 KINS2<sup>6)</sup>에 입력하여 OLFP에 入力으로 필요한 자료를 생산하게 된다. 분석에 사용된 계산과정이 Fig.1에 표시되어 있다. Fig.2에는 고리1호기의 1주기에 대해 부하추중운전을 시도한 결과가 요약되어 있다. 운전에 있어서의 몇가지의 중요한 特性을 살펴보면 다음과 같다.

① 부하추중운전을 시작한 처음 3시간 동안 출력이 단계적으로 50%까지 감소된다. 그후 6시간 동안 50%출력에서 머물고 다음 3시간 동안 100%까지 증가시킨다.

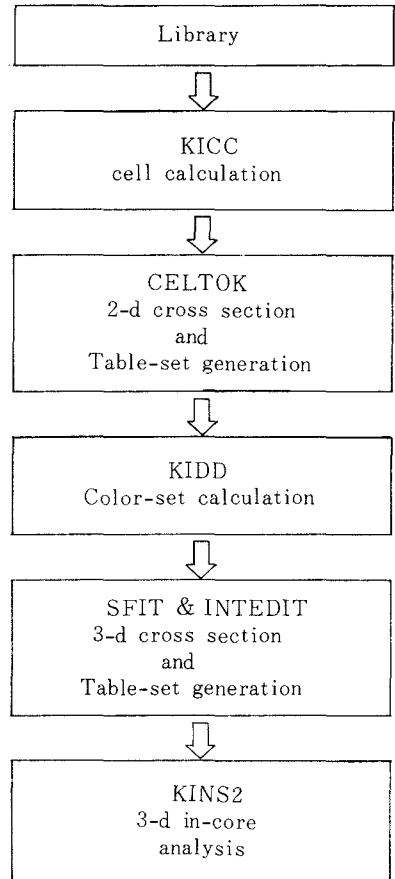
② 출력 감소시 제어봉으로 먼저 반응도를 제어한다.

③ 원하는 出力準位에서 AO를 검사하고 임계 보론 농도를 찾는다.

④ 시간간격 동안에는 Xe생성 등의 다른 반응도 변화를 보론으로 제어한다.

⑤ MINB 운전방법에서는 보론의 농도를 고정시키고 Xe 등의 반응도 변화 제어는 제어봉

Fig. 1 Scheme of Computing System



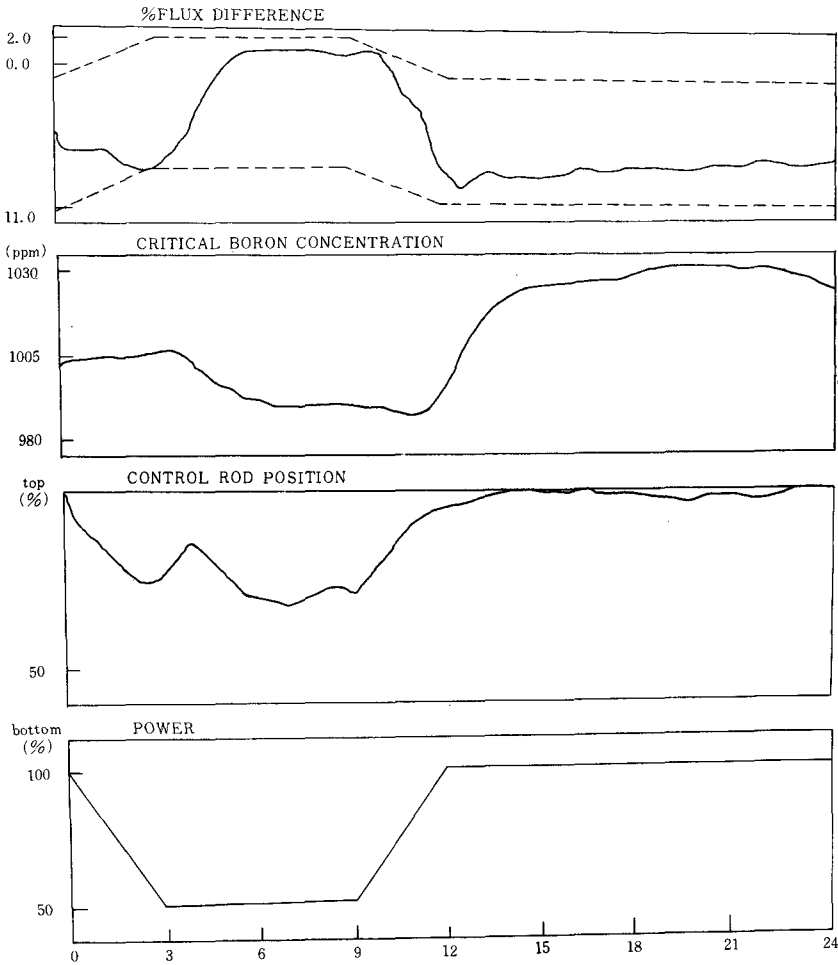
으로 한다.

Fig. 3~5에 MINB 제어방법을 週期初에 대하여 사용한 결과를 나타내었는데 그 特性은 다음과 같다.

① 처음 3시간의 출력감소 동안 AO는 陰으로 유지된다. 그러나 Fig.3에서 보듯이 Xe는 점점 陽의 Xenon Offset(XO)를 갖는다. 이러한 Xe의 진동으로 보론조절계통이 동작된다.

② 50%출력에서 Xe量은 서서히 감소하며 陰의 XO를 갖게 된다. Xe에 의해 늘어난 반응도를 보상하기 위해 제어봉 bank들이 인출되며 보론농도의 변화를 유발한다. 임계상태를 유지하게 되면 AO는 陽으로 변하면서 Xe은 점점 더 밑으로 기울게 된다(Fig.4).

Fig. 2 12-3-6-3 Load Lollow Operation with MINB mode(KNU-11 CY1, BOL, 1st day)



③ 부하추중운전 시작후 6시간 정도에서 모든 반응도는 일시적으로 균형을 이루게 되며 제어봉의 움직임은 없다. 그러나 이런 현상은 Xe의 감소로 곧 무너지며, 제어봉은 더이상 인출되지 않는다. 그 이유는 AO의 한계에 도달했기 때문이며, Xe의 감소에 따른 陽의 반응도는 보론계통으로 제어하여야 한다.

④ 운전 시작후 9시간에는 출력이 다시 상승된다. 이때에는 제어봉을 인출시킬 수 있으며, 왼쪽으로 켜그러진 출력분포는 서서히 밀쪽으로 기울면서 보론량의 증가를 유도한다. Xe의 분포는 왼쪽으로 양이 증가하면서 陰의 AO를

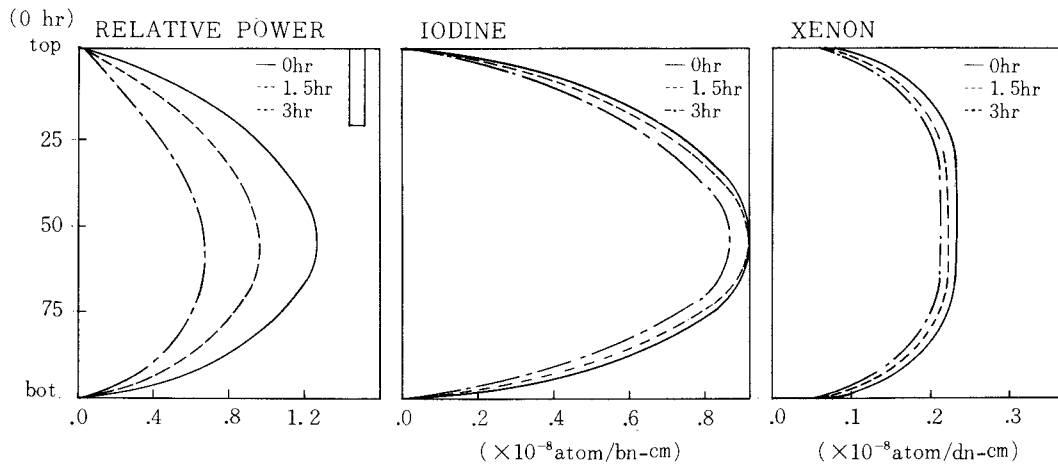
갖게 된다.

⑤ 이 분석 결과에서 출력이 상승되는 3시간 동안 반응도 조절인자들의 변화가 가장 심하며 이때 安全因子들이 제한치에 위배되지 않는지 검토하여야 한다.

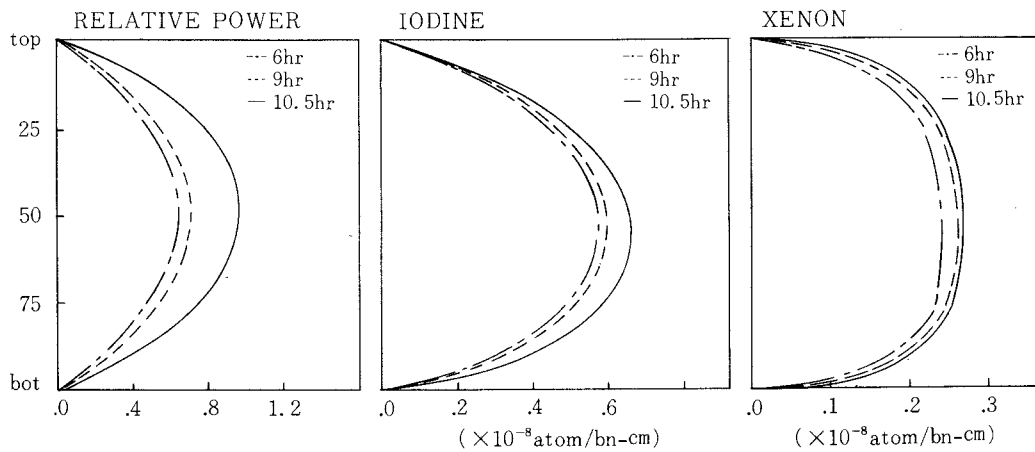
⑥ 15시간 정도가 경과하면 Xe은 계속하여 왼쪽으로 움직이며 陽의 XO를 갖는다(Fig. 5).

週期末에서의 分析에서도 비슷한 경향을 볼 수 있으나 週期末에는 보론의 농도가 낮기 때문에 제어봉으로 대부분의 반응도 변화를 제어하는 것이 바람직하다. 즉 出力減少時 제어봉을 깊이 삽입하고, 出力上昇時에는 보론의 회

**Fig. 3 Axial Distribution for Relative Power, Iodine and Xenon(1st day)**



**Fig. 4 Axial Distribution for Relative Power, Iodine and Xenon(1st day)**



**Fig. 5 Axial Distribution for Relative Power, Iodine and Xenon(1st day)**

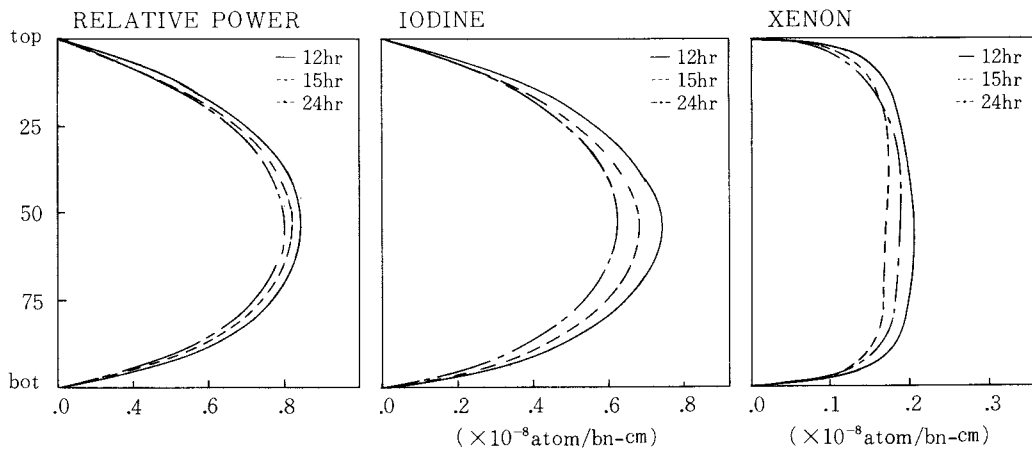
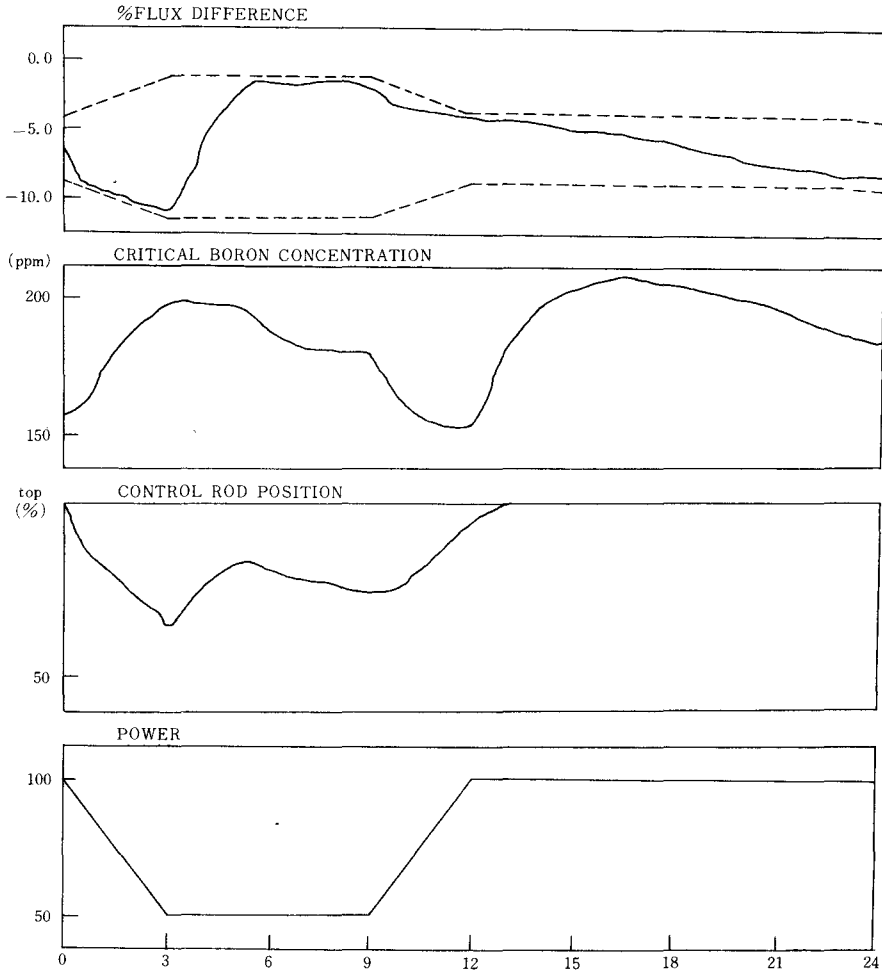


Fig. 6 12-3-6-3 Load Follow Operation with MININB mode(KNU-1 CY-1, EOL, 1st day)



석이 요구되는 경우 가급적 제어봉으로 대신 하는 것이 좋다. 따라서 週期末의 경우 MINB 방법은 적합하지 않는 것으로 판명되었고, MAX-RTP 운전이 유효한 것으로 본다.

週期初와 週期末의 결과를 비교해 보면 週期末의 경우 운전시작 9시간 후에 출력을 높일 경우 AO의 움직임이 더욱 느리게 陰으로 가는 것을 볼 수 있다(Fig. 6).

〈參考文獻〉

1. Y. S. Choi, et al., Load Follow Operation in Nuclear Power Plant, NRC-85N-T04, KEP-CO(1986)

2. DDID-A One-dimensional Two-group State Neutron Diffusion Theory Program, KAERI/TR-31/81, KAERI(1981)  
 3. MATPRO-Version 10, TREE-NUREG-1180; 2, EG&G(1978)  
 4. J. B. Lee, et al., KICC-A Space-dependent Cell Spectrum and Depletion Program for Analysis of LWR Lattices, KAERI/TR-48/83, KAERI(1938)  
 5. S. K. Lee, et al., KIDD-A KAERI Improved Diffusion Depletion Program, KAERI(1984)  
 6. S. K. Lee, et al., KINS2-A KAERI Improved Nodal Scheme Version' 2, KAERI(1984)