

# 가압경수형 원자로에서의 제논 영향으로 인한 축방향 출력진동 최적제어

## Time-Optimal Control of Xenon-Induced Axial Power Oscillations in Pressurized Water Reactor

윤 원 호\*

한국에너지연구소

박 귀 태

고려대학교

### 1. 서 론

원자력발전소의 노심은 주기초에는 축방향 제논진동에 대하여 안정하나, 연소도가 증가함에 따라 안정도가 차츰 감소하여 주기말에는 불안정하여지며, 실제적으로 출력밀도가 높은 대형 가압경수형 원자로의 경우 전주기 동안 축방향 제논진동에 대하여 안정된 노심을 설계하기는 힘들다.<sup>1)~4)</sup> 제논진동은 출력분포진동을 유발하며, 심할 경우 국부적인 핵연료 손상까지 일으킬 우려가 있으므로 조속히 평형상태를 유지하도록 제어해 주어야 한다. 제논의 생성 및 소멸, 증성자를 흡수하는 독작용 및 제어방법 등에 대하여는 20여년에 걸쳐 많은 사람들이 연구하여 왔다.<sup>4)~9)</sup>

현재 주로 사용되고 있는 "일정 축방향 출력편차 제어방법"은 시행-착오법에 의존하며 또한 거의 계속적으로 제어봉을 움직여야 하는 단점이 있다.<sup>3),4)</sup> 축방향 출력편차(axial offset: AO)는 노심 상단 및 하단의 출력차이를 전체 출력으로 나누어 주는 값으로 정의된다. 여기서는 실제 원자력발전소에서 적용하고 있는 구속조건을 고려하여 제논진동에 의한 축방향 출력진동을 최대한 시간에 평형상태로 이끌기 위한 제어방법에 대하여 연구하였다.

### 2. 계통방정식 및 최적제어

원자로의 동특성은 원자로내에서 생성되는 증성자 및 손실되는 증성자의 관계에 의하여 묘사된다. 이에 대한 해석은 증성자 확산방정식을 풀어 수행하며,<sup>10)</sup> 여기서는 증성자속( $\rho$ ), 제논( $X_0$ ) 및 옥소( $I$ )의 상호 관계식을 풀어 제논진동에

대한 해석을 한다.

원자로의 비선형 증성자 확산방정식에 섭동법을 취하여 평형상태로 부터의 미소변위에 대한 선형 계통방정식을 도출하여 행렬형태로 나타내면 다음과 같다:

$$\dot{\underline{x}}(t) = A\underline{x}(t) + B u(t) \quad (1)$$

여기서

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서 나타나는 각 변수에 대한 정의 및 값들은 참고문헌(11)에 수록되어 있다.

식(1)의 평형상태는 다음과 같이 놓을수 있다:

$$A\underline{x} + B u = 0 \quad (3)$$

또는

$$\underline{x} = -A^{-1} B u = u \underline{z} \quad (4)$$

식(4)는 제어목표인 최종상태로서, ( $x_1, x_2$ ) 평면상에서 원점을 지나는 직선을 나타낸다.

만일 압력에 대한 구속조건이 다음과 같다면:

$$U^- \leq u(t) \leq U^+ \quad (5)$$

식(4)로 나타나는 최종목표점은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \{ \underline{x} \mid \underline{x} = r \underline{z}; U^- \leq r \leq U^+ \} \quad (6)$$

여기서 취급하고 있는 문제는, 최적제어이론에 의하여, 최종시간,  $T$ , 및 최종상태,  $\Phi(T)$ , 가 고정되지 않은 일정구간의 선분에 대한 것임을 알 수 있다.<sup>12)</sup>

평가지표는 다음과 같이 정의되며 ;

$$J = \int_0^T dt \quad (7)$$

Pontryagin의 최소원리를 적용하여 최적제어 방법을 구하면 "bang-bang" 제어방법이 도출된다.

도출된 제어방법에 따라 제어목적, 열수력학적 제한 및 제어봉 이동효과등을 고려한 비선형 중성자 확산방정식을 유한편차방법으로 푸는 컴퓨터 코드<sup>13),14)</sup>를 이용하여, 원자로를 컴퓨터로 모의운전한 결과는 다음 그림과 같이 나타난다.

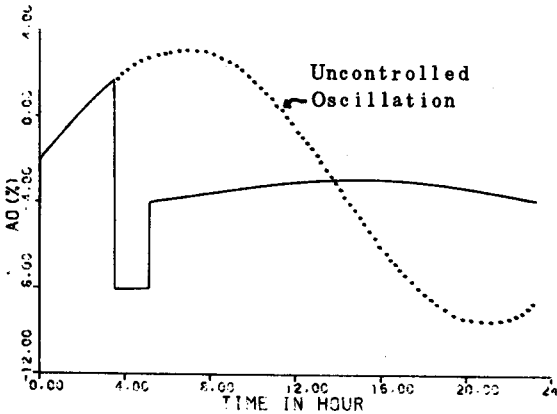


그림 1. 축방향 출력분포 최적제어

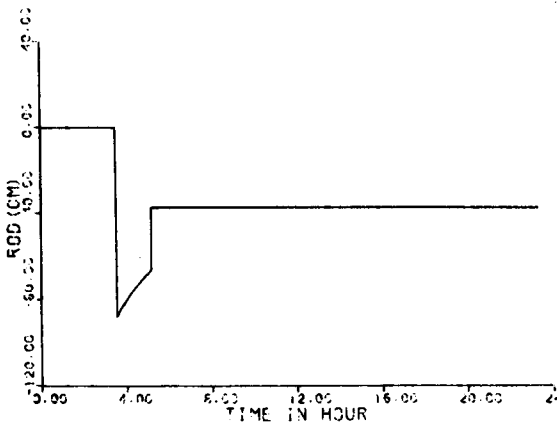


그림 2. 최적제어를 위한 제어봉 이동

### 3. 결론 및 토의

앞의 그림에서 보듯이 축방향 출력진동은 최적제어방법에 의해 거의 완벽하게 평형상태에 도달하였다. 제어후의 미소한 진동은 비선형 중성자 확산방정식을 선형화하는 과정에서 고차항들을 무시한 영향 및 컴퓨터 모의운전의 부정확에 기인한 것으로 사료되며, 원자로의 제어영향으로 인한 축방향 출력진동은 언제라도 제어봉을 구동하여 최단시간에 평형상태로 이끌수 있음을 알 수 있다. 또한 일단 평형상태에 도달한 이후에는 아무런 제어동작이 필요하지 않으므로, 이 제어방법은 원자로 운전원의 부담을 덜어준은 물론 안전성 및 경제성 향상에도 크게 기여할수 있을 것으로 사료된다.

### - 참고 문헌 -

1. A.T.Chiang and W.D.Beckner, "A Reformulation of the Xenon Optimal Control Problem Using Lambda Medes". Proc.Conf. Computational Methods in Nucl.Eng., CONF 750413, ANS, 1975
2. 문호주, 한기인, "경수로심의 제어진동해석", 원자력학회지, 14-2, 1982
3. "원자력 1호기 최종안전성분석보고서", 16 장, 한국전력공사, 1977
4. E.J.Schulz and John.C.Lee, "Time-Optimal Control of Spatial Xenon Oscillations to a Generalized Target", Nucl. Sci. and Eng.;73, 140~152, 1980
5. J.Chermick, "The Dynamics of a Xenon Controlled Reactor", Nucl.Sci. and Eng.;8. 233~243, 1960
6. G.S.Lellouche, "Space Dependent Xenon Oscillations", Nucl.Sci. and Eng.;12, 482~489, 1962
7. D.C.Bauer and C.G.Poncellet, "Practical Xenon Spatial Control", Nucl.Tech.;21, 165, 1977
8. J.Karppinen, R.M.Versluis, and B.Blomness, "Core Control Optimizing for

- Scheduled Load Changes in Large PWR ",  
Nucl.Sci. and Eng. ; 71, 1~ 17, 1979
9. A.M.Christie and C.G.Poncelet, "On the Control of Spatial Xenon Oscillations", Nucl.Sci. and Eng. ; 51, 10~ 24, 1973
  10. J.J.Duderstadt and L.J.Hamilton, " Nuclear Reactor Analysis ", John Wiley and Sons Inc., Ch.7, 1976
  11. 윤원효, " Time-Optimal Control of Xenon Induced Axial Power Oscillations in PWR ", 석사학위 논문, 고려대학교, 1983
  12. D.E.Kirk, " Optimal Control Theory ", Prentice Hall, N.J., Ch.4, 1970
  13. 문호주, " DDID : A One-Dimensional Two-Group Steady State Neutron Diffusion Theory Program ", KAERI/TR-31/81, 한국에너지연구소, 1981
  14. John C.Lee, " MID : A One-Dimensional PWR Core Simulator Program ", Dept. of Nucl. Eng., The Univ. of Michigan, 1979