

## 중수로 핵연료 교환기 램집합체 시스템의 운동특성 해석 및 시스템 식별

### System Modeling and Identification based on Motion Characteristics for Ram Assembly of Fueling Machine in PHWR

김종대, 조병학, 김준홍, 신창훈, 김석곤

한국전력공사 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

한전전력연구원은 중수로 원전 운전 안전성 현안 연구과제의 일환으로 중수로 핵연료교환기 램집합체의 시스템 식별을 수행하였다. 이를 위해 유압모터로 작동되는 2개의 램의 동적 거동에 대해 백래쉬의 영향을 고려하여 시스템에 대한 운동방정식을 세우고, MATLAB을 이용하여 시스템 파라미터에 대한 동적거동을 시뮬레이션하여 시스템 파라미터를 추정하였다. 향후 완성된 시스템 운동 방정식을 이용하여 램집합체 mock-up을 제작한 후 핵연료교환기 이상진단시스템을 구성하는 연구를 진행할 예정이다.

#### Abstract

As part of PHWR operational safety issues, KEPRI accomplish system identification for ram of fueling machine in PHWR plants. First of all, we setup the motion equation of system considering nonlinear backlash term for L-ram & B-ram powered by hydraulic motor. and then we estimate system parameters by simulation via MATLAB. Henceforward, we will develop the fault diagnosis system for ram of fueling machine in PHWR plants consist of mock-up for ram assembly.

#### 1. 서 론

중수로 원전의 핵연료교환기는 운전 중 핵연료 교환이 가능하도록 제작된 원통형 압력용기로서 램집합체와 매거진 집합체 및 분리기 집합체로 구성되어 있으며 길이는 약7m로 램 집합체 구동부를 제외한 나머지 부분에는 중수가 채워져 압력을 형성하고 있다. 램집합체는

3개의 램으로 구성되어 있으며 이중 B-RAM과 L-RAM은 유압모터에 의해 구동되며 C-RAM은 중수압으로 구동된다. 각 램에는 위치측정기가 설치되어 있어 램의 위치를 계속해서 제어계통에 보내며 유압모터에 공급되는 유압과 유량을 측정하여 시스템의 이상유무를 체크하고 있다. 그러나 이러한 이상신호는 시스템의 이상유무만을 알려줄 뿐 이상현상의 원인규명 및 이상현상 발생 예측 등 보다 능동적인 이상현상 대처에는 도움이 되지 못하고 있다. 따라서 전력연구원에서는 위치센서, 힘센서, 유압센서, 진동센서를 핵연료교환기에 장착하고 여기에서 들어오는 신호를 비침투적 처리기법을 통해 분석하여 동력전달 계통의 상태, 마모에 따른 위치 오차, 위치센서 불량, 윤활유 공급상태 불량, 미끄러짐 현상 및 진동, 누수, 충돌 등을 검출하고 이를 작업자에게 알려주는 핵연료교환기 램집합체 이상진단 시스템 개발을 목표로 하여 연구를 진행 중이다. 현재까지 램집합체를 포함한 핵연료교환기에 관한 연구는 중수로원전을 다수 보유하고 있는 캐나다에서 주로 이루어졌으나 보수실에서 램헤드를 작동시켜보는 방법으로 각부분이 제대로 동작하는지를 미리 살펴보는 수준이며 핵연료 교환기에 부착되어 있는 센서에서 측정되어 제어실에 보내지는 신호는 연료교환기의 작동과정에 관한 정보만을 줄 뿐 상태에 관한 정보를 주지는 못하는 실정으로 핵연료 교환기 이상진단 시스템에 관한 연구는 본격적으로 이루어지지 않은 상태이다. 본 논문에서는 램집합체의 거동을 해석하여, 운동방정식을 세우고, 현장에서 취득 가능한 데이터를 모델식에서 유압모터의 동력과 이동거리의 데이터로 취득하여 램집합체 시스템을 식별(identification)을 하여 주요 시스템 파라미터에 대한 수치를 예측한다.

## 2. 램 집합체 시스템의 모델식

램 집합체는 중수로 원자로에서 연료다발, 각종 마개 및 안내관의 설치 및 제거를 목적으로 필요한 동작을 제공한다. 핵연료 교환기 램은 B-램, L-램 및 C-램으로 구성되어 있고, 램 하우징에 의하여 지지된다.

이 중에서 B-램과 L-램은 유압모터로 구동되며, C-램은 중수압력에 의해 구동된다.

램 하우징은 2개 부분으로 나누어지고, 램이 들어 있는 용기부와 기어박스가 들어 있는 램 뒷 몸체로 나누어 진다.

본 연구에서는 유압모터에 의해 구동되는 B-램과 L-램만으로 한정한다.

램집합체의 거동은 유압모터에 의한 동력전달부와 램하우징내에서의 램이동 상태가 주 관심 대상이다. 램집합체의 거동을 모사하고, 현장에서 취득한 유압모터의 동력과 이동거리의 데이터로 램집합체 시스템 식별해 본다.

램의 위치제어는 위치측정기에 의해 측정되어 제어용 전산기로 전송되고 on/off 제어신호에 의해 유압모터의 구동력이 결정된다.

램 집합체의 운동은 유압모터의 동력을 전달하는 기어와 스크류에 의한 직선운동으로 해석할 수 있다.

그림 1은 램 집합체 거동 시스템을 간단히 나타내었다.

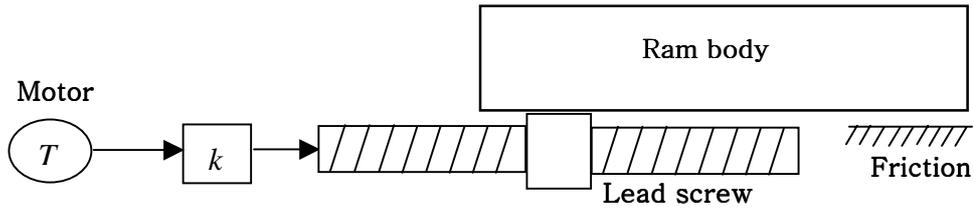


그림 1. 램 집합체 시스템의 모형도

즉, 모터로 구동되는 램 집합체의 이동은 모터와 스크류의 조합에 의한 Newton의 직선운동 방정식으로 나타낼 수 있다.

먼저, 모터의 회전운동방정식은 다음 식과 같다.

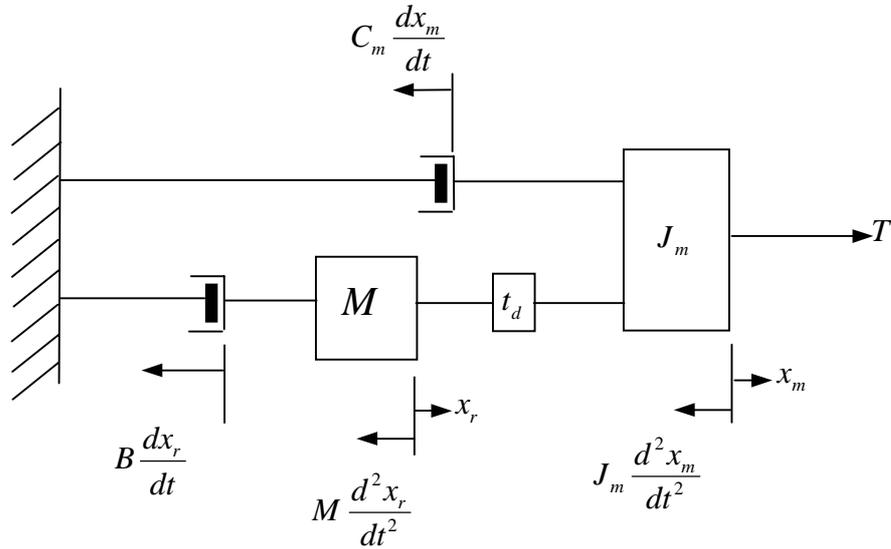


그림 2. 램 집합체 시스템의 블록선도 및 자유도선

$$T(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} + T_F \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 모터의 토크,  $J$ 는 축 관성,  $C$ 는 점성마찰계수,  $T_F$ 는 Coulomb 마찰력이다. On/Off제어기의 제어신호에 따라 조절되는 모터의 토크  $T$ 는

$$T(t) = \begin{cases} u & e > 0 \\ -u & e < 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $u$  는 제어입력의 크기이다.

단위 회전각에 대한 리이드(lead)를  $k$  로 하여 이동거리로 환산하여 나타내면,

$$x(t) = k\theta(t) \quad (3)$$

식(1)의 회전운동방정식에 식(3)에 대입하여 스크류에 의한 직선운동방정식으로 변환하여, 이동거리  $x$  에 대해서 나타내면,

$$T(t) = \frac{J}{k} \frac{d^2 x_m(t)}{dt^2} + \frac{C}{k} \frac{dx_m(t)}{dt} + T_F \quad (4)$$

여기서,  $J/k$  는  $J_m$  이고,  $C/k$  는  $C_m$  이고,  $T_F$  는 모터의 토크에 비해 상대적으로 작다고 보고 무시하였다. 그래서, 다시 정리하면 다음과 같다.

$$T(t) = J_m \frac{d^2 x_m(t)}{dt^2} + C_m \frac{dx_m(t)}{dt} \quad (5)$$

램 본체는 1 자유도를 갖는 직선운동을 하므로 다음과 같이 직선운동식으로 나타낸다.

$$f(t) = M \frac{d^2 x_r(t)}{dt^2} + B \frac{dx_r(t)}{dt} \quad (6)$$

여기서,  $M$  은 램 본체의 질량,  $B$  는 점성마찰계수이다.

그림 3과 같이 모터의 동력을 램 본체에 전달하는 기계적인 결합구조에서 일반적으로 백래쉬(backlash)와 같은 비선형적인 요소가 포함된다. 이것은 동력이 전달되는 초기나 회전 방향을 바꿀 때, 입력측과 출력측의 접촉이 일시적으로 없는 동안에 동력이 전달되지 못하고 일정 시간만큼 정지하게 된다. 일반적으로 이런 현상은 모터 기어의 불완전한 접촉에 의해 발생되고, 피드백 제어 시스템에서 출력 지연(delay), limit cycle 등을 일으킨다.

일반적으로 백래쉬의 입출력 특성은 그림 4과 같고, 모델식은 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \begin{cases} m(x(t) + d/2) & \text{for } x(t) \leq d/2 \\ m(x(t) - d/2) & \text{for } x(t) \geq -d/2 \\ y(t-1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

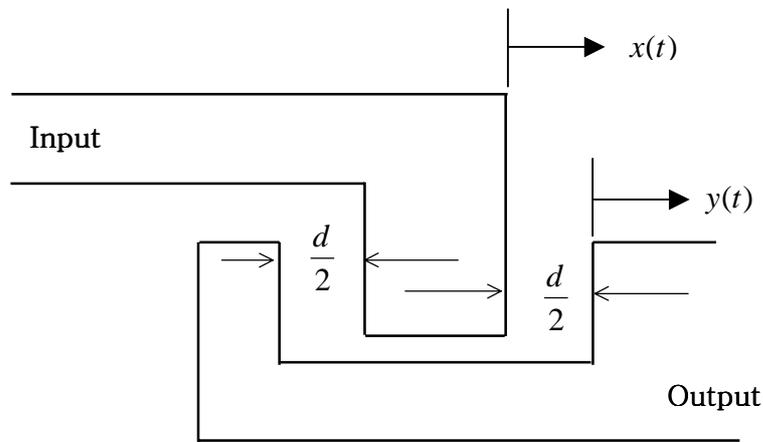


그림 3. 백래쉬가 일어나는 기계결합

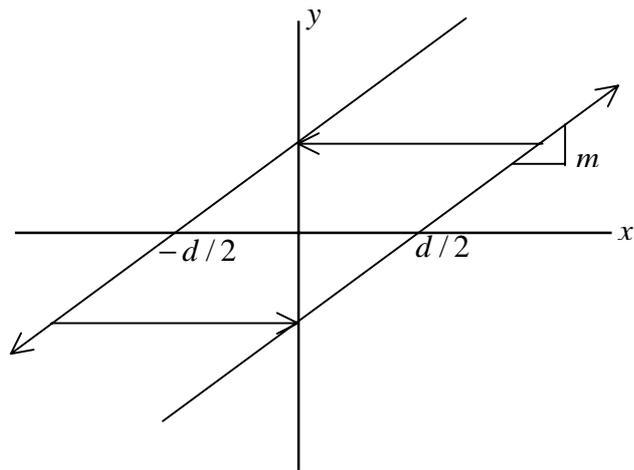


그림 4. 백래쉬의 입출력 특성

본 시스템에서는 스크류가 램 본체와 결합하기 전 백래쉬 불감대(backlash deadzone)에서는 모터의 운동 방정식을 따르고, 결합된 후에는 스크류에 의해 모터의 동력이 전달되면서 식(5)과 식(6)으로부터 다음과 같은 새로운 직선운동방정식을 따르게 된다.

$$f_r(t) = (J_m + M) \frac{d^2 x_r(t)}{dt^2} + (C_m + B) \frac{dx_r(t)}{dt} \quad (8)$$

다음과 같이 동력 전달과정에서 동력이 전달되지 않는 백래쉬 불감대를 시간지연으로 해석하였다.

$$f_r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ T(t-t_d) & t \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

식(8)을 라플라스 변환하고, 시스템 식별에 의한 전달함수 유도와 시스템 파라미터의 연산을 간단하게 하기 위해서 시간지연을 분수함수 형태로 근사화 하였다.

$$\begin{aligned} f(s) &= e^{-t_d s} T(s) \\ &= \frac{2-t_d s}{2+t_d s} T(s) \end{aligned} \quad (10)$$

식(8)을 라플라스 변환하여, 식(10)을 대입하여 정리하면, 모터 토크에 대한 램 본체의 이동 거리는 다음과 같은 전달함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{x_r(s)}{T(s)} = \frac{2-t_d s}{t_d (J_m + M)s^3 + \{2(J_m + M) + t_d (B + C_m)\}s^2 + 2(B + C_m)s} \quad (11)$$

### 3. Simulation

위에서 전개한 모델식을 검증하기 위해 시스템의 파라미터를 표 1과 같이 설정하고, 시스템의 동적 거동을 Simulink(MathWorks co.)을 이용하여 시뮬레이션하였다.

시스템 파라미터	설정값
모터의 관성, $J$ [kg-cm <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> ]	2
램 본체의 질량, $M$ [kg]	10
스크류의 점성마찰계수, $C$ [N-cm-s/rad]	5
램 본체의 점성마찰계수, $B$ [N-sec]	10
회전각 당 이동거리, $k$ [cm/rad]	1

표 1. 시스템 파라미터 설정

설정값은 시스템의 시뮬레이션과 시스템 식별을 위해 임의로 설정한 값으로 실제 램 집합체 시스템의 실제 수치와는 차이가 있다.

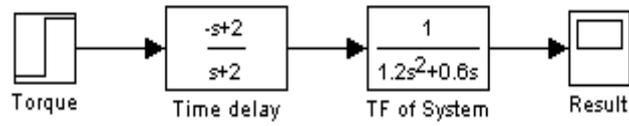


그림 5. 램 본체 동적거동 모사를 위한 Simulink 블록도

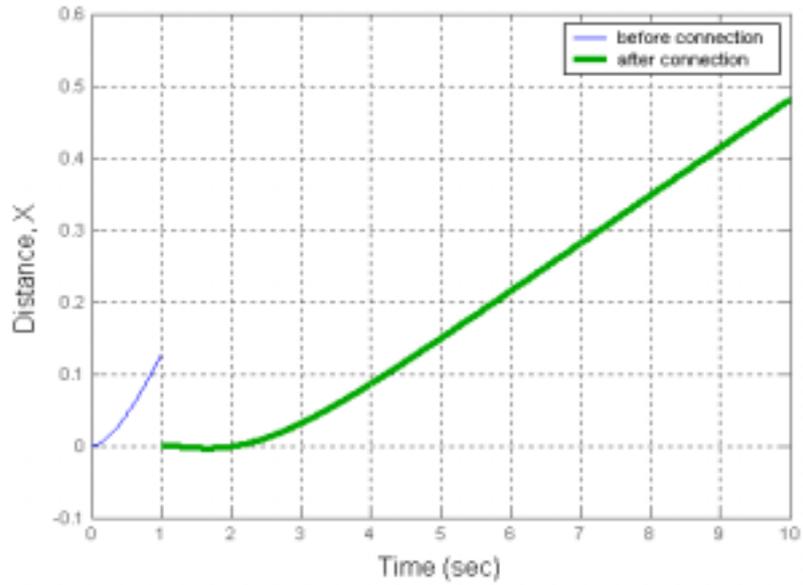


그림 6. 모터의 양(+) 방향 회전 시 램 본체의 동적 거동

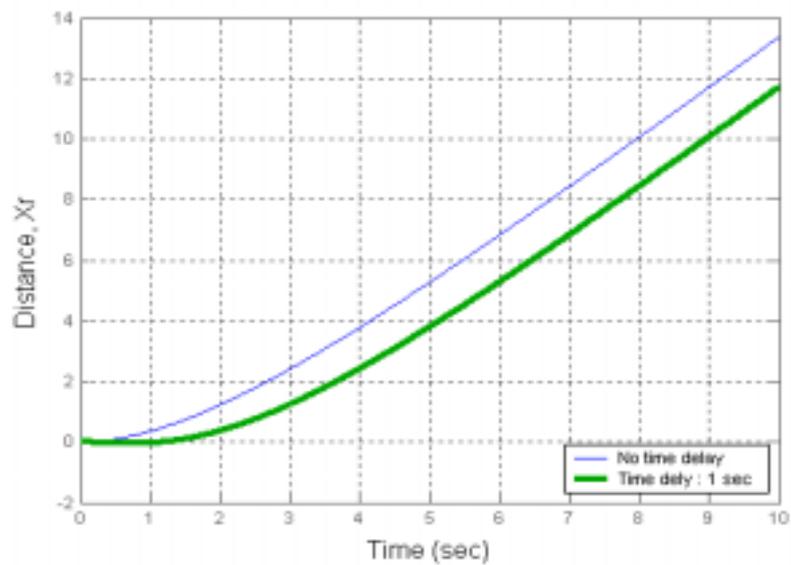


그림 7. 시간지연에 따른 램 본체의 동적 거동

그림 6은 모터가 (+) 방향으로 회전 시에 나타나는 램 본체의 이동거리를 시간에 따라 보였다. 모터가 기동하고 나서 초기에 시간지연동안은 램 본체와 모터의 스크류가 결합되지 않아 램 본체는 움직이지 않고, 스크류만 움직이게 된다. 이것은 백래쉬 불감대에서는 접촉이 일시적으로 일어나지 않아 램 본체에 모터의 토크가 전달되지 않는 것으로 설명할 수 있다. 이것은 토크 전달과정에서의 시간지연으로 해석이 가능함을 보여주고 있다. 그림 7는 램 본체에서 시간지연이 없는 경우와 백래쉬로 인해 시간지연이 있는 경우를 비교하였다. 백래쉬 불감대에서의 이동 거리 만큼 시간지연으로 나타나고, 이동거리의 차이가 백래쉬 불감대의 1/2 크기가 된다.

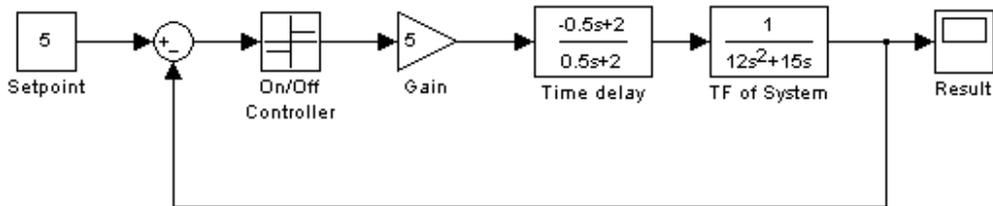


그림 8. 피드백 제어 시스템의 Simulink 블록선도

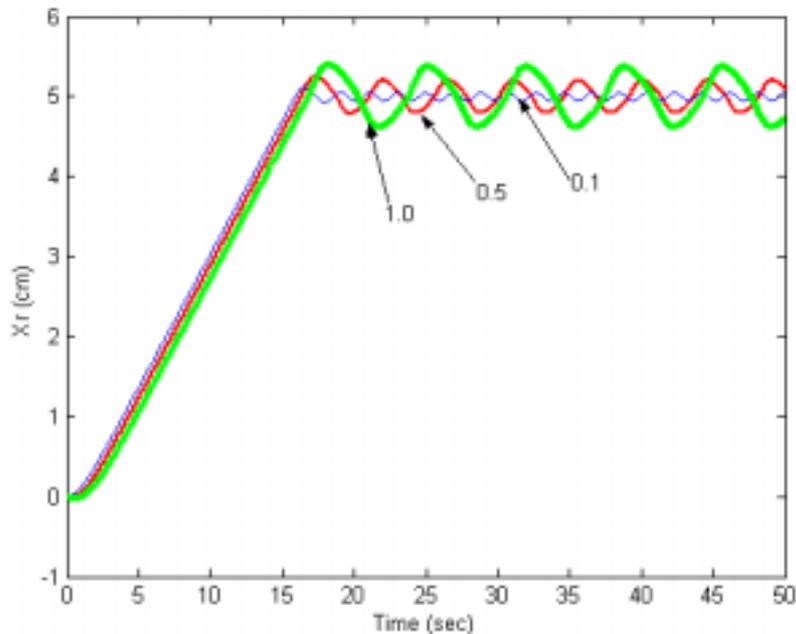


그림 9. 시간지연에 따른 동적 응답

피드백 제어 시스템에서 램 집합체 시스템의 동적 거동을 모사하였다. 그림 8은 피드백 제어 시스템의 모사를 위한 Simulink 블록선도를 나타내었다.

백래쉬의 영향이 0.1 sec의 시간지연으로 나타날 때, 목표위치에서 일정한 진폭을 갖는 limit cycle을 발생시킨다. 그림 9에서 알 수 있듯이 시간지연이 커지면, limit cycle은 더욱 크게 나타난다.

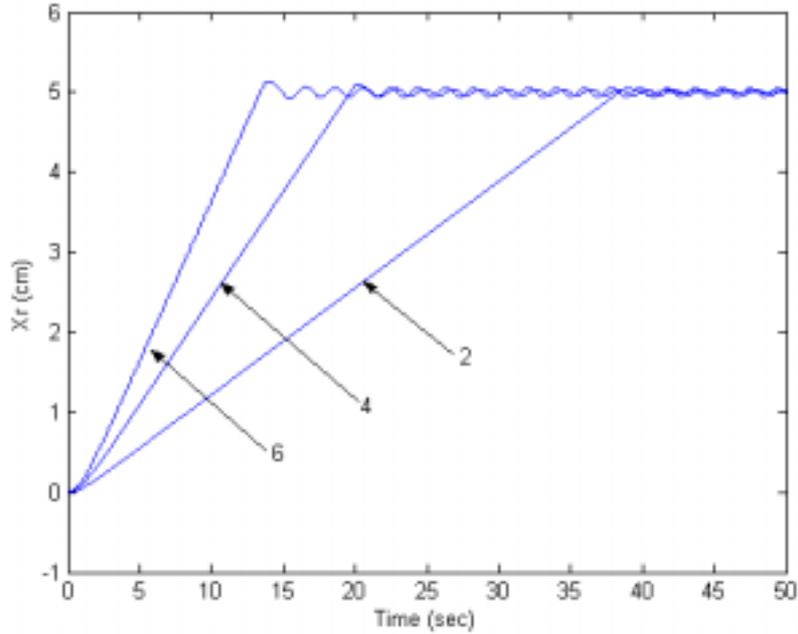


그림 10. 모터 토크에 따른 동적 응답

그림 10는 모터 토크에 따른 시스템의 응답을 보였다. 제어 입력인 모터의 토크는 limit cycle의 진폭변화보다는 상승시간에 더 영향을 주는 변수임을 확인하였다.

#### 4. 시스템 식별(System Identification)

시스템 식별 통하여 측정 가능한 시스템의 입출력 데이터를 가지고, 모델식을 세운 후, 파라미터를 예측하였다.

파라미터 예측(parameter estimation)은 현재의 시스템 출력을 과거의 출력과 현재와 과거의 입력값의 관계로 나타낸 차분방정식으로 모델화한 후 least square method로 모델에 의한 예측 출력값, 실제 데이터의 출력값의 차이의 제곱의 합이 최소화 되도록 파라미터를 추정해 가도록 하였다.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \Lambda + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-1) + \Lambda + b_{nb} (t-nb) \quad (12)$$

전달함수를 예측하기 위하여 ARX모델로 고쳐 나타낸 후 matlab의 system identification toolbox 함수를 이용하여 연속형 전달함수 형태로 유도하였다.

식(12)의 차분방정식을 ARX 모델식으로 나타내면,

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (13)$$

여기서,  $A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \Lambda + a_{na}q^{-na}$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + \Lambda + b_{nb}q^{-nb}$$

시스템 식별에 의해 추정된 시스템의 최종 전달함수 형태는 다음과 같으며,

$$G_{\text{sys}}(s) = \frac{b_1s + b_2}{s^3 + a_1s^2 + a_2s} \quad (14)$$

이 전달함수로부터 식(10)에 의해 식(15)~식(18)과 같이 파라미터를 변수로 하는 대수방정식을 구할 수 있다.

이미 알고 있는 시스템 파라미터,  $J_m$ ,  $M$  와 대수 방정식으로부터 구하고자 하는 파라미터인 시간지연  $t_d$ , 시스템 점성마찰계수( $B + C_m$ ) 를 계산한다.

$$a_1 = \frac{2(J_m + M) + t_d(B + C_m)}{t_d(J_m + M)} \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{2(B + C_m)}{t_d(J_m + M)} \quad (16)$$

$$b_1 = \frac{-t_d}{t_d(J_m + M)} \quad (17)$$

$$b_2 = \frac{2}{t_d(J_m + M)} \quad (18)$$

시스템 파라미터	실제값	예측값
점성마찰계수, $B + C_m$ [N/cm-sec]	15	14.894
시간지연, $t_d$ [sec]	0.1	0.098

표 2. 시스템 파라미터 실제값과 시스템 식별에 의한 예측값

표 2은 시스템 식별에 의한 파라미터 예측값과 실제값을 비교해 보였다.

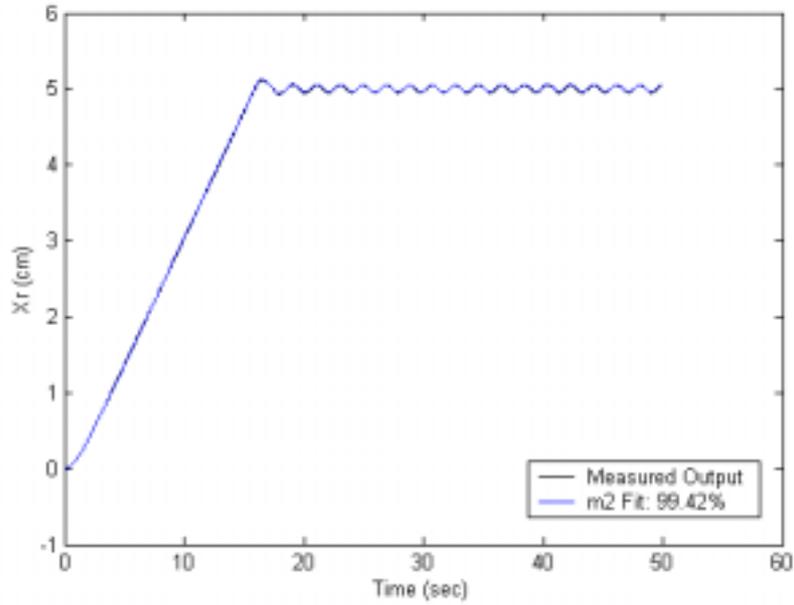


그림 11. 시스템 식별의 정확도

그림 11은 해석적으로 구한 모델식의 시뮬레이션에서 샘플링한 시스템의 입출력데이터와 시스템 식별에 의한 시뮬레이션 데이터를 비교하였다. 시스템 식별로부터 예측한 데이터는 실제 데이터와 99.42%의 정확도를 보였다. 예측한 시간지연으로부터 백래쉬 불감대의 크기를 구하는 것은 라플라스 변환의 최종값 정리에 의해 다음 식으로 구할 수 있다.

$$d = 2 \cdot \left| \lim_{s \rightarrow 0} s \{ x_r^t(s) - x_r^{t+d}(s) \} \right| \quad (18)$$

여기서, 이 시스템에서 보인 시간지연 0.1 sec은 백래쉬 불감대의 크기 0.67 cm 로 계산되었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 램 집합체 시스템의 램 본체에 대해서, 백래쉬의 영향을 고려하여 운동방정식을 세우고, 시뮬레이션으로 시스템 파라미터에 대한 동적 거동을 파악하였으며, 주요 시스템 파라미터를 예측하는 방법을 제시하였다.

백래쉬의 영향은 램 본체에 작용하는 토크의 시간지연으로 해석하였으며, 현장에서 측정 가능한 모터의 토크와 램 본체의 이동거리의 데이터로 시스템 식별이 가능하도록 전달함수

를 유도하였다. 백래쉬는 피드백 제어에서 limit cycle의 발생시켰으며, 불감대의 크기에 따라서 진폭이 변화하였다.

파라미터 예측에 의해 계산된 시스템의 점성마찰계수 및 백래쉬 불감대 크기는 램 집합체 시스템의 움직임을 감시하고, 이상 유무를 판단할 수 있는 중요한 데이터를 제공해 줄 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- (1) 한국전력공사 월성원자력본부, “중수로 핵연료 교환설비”, 상권, pp. 87-121
- (2) 장경선, 김옥현, “마찰저항 및 백래쉬가 존재하는 직선운동 시스템의 ON-OFF 위치 제어 특성 해석”, 대한기계학회논문지 제17권 제3호, pp 645-651, 1993.
- (3) Benjamin C. Kuo, “Automatic Control Systems”, 5<sup>th</sup> ed. pp.118-136, 1988.
- (4) Dong H. Chyung, “Output Feedback Controller For Systems Contraining A Backlash”, Proceedings of the 31<sup>st</sup> Conference on Decision and Control Tucson, Arizona, pp. 3429-3430, Dec. 1992.
- (5) Gang Tao and Petar V. Kokotovic, “Adaptive Control of Systems with Unknown Output Backlash”, , IEEE Trans. On Auto. Control, VOL. 40, NO. 2, pp. 326-330, Feb. 1995.