2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

중수로 핵연료교환기 램집합체의 시스템 모델링 및 모형 제작

김준홍,변승현,조병학,신창훈,김진석,양장범*,서언식**
한국전력공사 전력연구원*,한수원(주)**

System Modeling of PHWR Fuelling Machine Ram Assembly and Development of the Mock Up of RAM Assembly

J.H.Kim, S.H.Byun, B.H.Cho, C.H.Shin, J.S.Kim, J.B.Yang*, E.S.Seo**
KEPCO*, KHNP Co.**

Abstract - 중수로 핵연료교환기 램집합체 이상진단시스템 개발과제의 일환으로 램집합체의 시스템 모델링을 수행하고 이를 기초로 램집합체 모형(Mock Up)을 설계 제작하였다. 이를 위해 램집합체 중 B-램의 동적거동에 대해 비선형요소의 영향을 고려하여 시스템에 대한 운동방정식을 유도하였다. 그리고 B-램의 구조를 단순화 시킨 모형을 제작하고 이를 검증하기 위해 발전소 현장에서 취득한 램집합체의 운동데이터와 모형의 데이터를 비교 분석하였다.

1. 서 론

중수로 원전의 램 집합체는 로봇의 End-Effector에 해당하는 장치이며 원통형 압력용기로서 내부에 매거진 집합체와 램 집합체 및 분리기 집합체가 포함되어 있다. 길이는 약 7m 정도이고 중수가 채워져 있다. 연료다발, 각종마개 및 안내관의 설치와 제거를 위하여 필요한 동작과 힘을 제공하며 B-램, L-램 및 C-램으로 구성되어 있다. 각 램에는 위치측정기가 설치되어 있어 램의 위치를 계속해서 제어계통에 보내며 유압모터에 공급되는 유압과 유량을 측정하여 시스템의 이상유무를 체크하고 있다. 그러나 이러한 이상신호는 시스템의 이상유무 만을 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 진행중이다. 본 논문에서는 램집합체의 거동을 해석하여, 운동방정식을 세우고, 이의 파라미터를 추정하고 램집합체 On-line 이상진단 시스템 개발에 활용하기 위한 램집합체 모형의 설계, 제작에 관하여 다룬다.

2. 본 론

2.1 램집합체 시스템 모델

램집합체의 운동을 파악하기 위해 시스템 모델을 유도한다. 램집합체와 같이 모터의 동력을 램 본체에 전달하는 기계적인 결합구조에서 일반적으로 백래쉬(backlash)와 같은 비선형적인 요소가 포함된다. 본 논문에서는 백래시가 없다고 가정하는 경우와 백래시를 고려하는 경우에 따른 램집합체의 시스템 모델을 유도한다.

2.1.1 백래시를 고려하지 않는 경우

램집합체의 운동은 그림 1과 같이 모터의 회전운동으로부터 볼스크류(Ball Screw)와 볼넛(Ball Nut)에 의한 회전-직선운동 변환과정을 통하여 이루어진다.

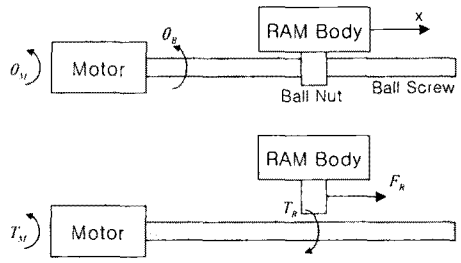

그림 1 램집합체 거동 개략도

$$T_M = J_M \frac{d^2\theta_M}{dt^2} + J_B \frac{d^2\theta_B}{dt^2} + D_M \frac{d\theta_M}{dt} + D_B \frac{d\theta_B}{dt} + T_R \quad (1)$$

where, T_M : 모터토크
J : 관성모멘트
D : 회전운동에 대한 댐핑계수
θ : 회전각
T_R : 램 본체의 이송운동에 의한 부하토크
M, B, R : 모터, 볼스크류, 램 본체

감속비($d\theta_B/d\theta_M$)가 일정하다고 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_M = J_{MB} \frac{d^2\theta_B}{dt^2} + D_{MB} \frac{d\theta_B}{dt} + T_R \quad (2)$$

$$J_{MB} = J_B + J_M \frac{d\theta_M}{d\theta_B} \quad D_{MB} = D_B + D_M \frac{d\theta_M}{d\theta_B} \quad (3)$$

볼스크류의 회전/직선운동 관계는 나사의 단위회전각에 대한 리드(lead) L을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$x_B = L\theta_B \quad (4)$$

램본체는 직선운동을 하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_R = M_R \frac{d^2x}{dt^2} + B_R \frac{dx}{dt} + F_f \quad (5)$$

where, M_R : 램본체의 질량
B_R : 직선운동에 대한 댐핑계수
F_f : 램본체에 작용하는 마찰력

볼스크류의 회전운동력이 램본체의 직선운동력으로 손실 없이 전달된다고 가정할 경우 다음 식을 얻을 수 있다.

$$T_R \frac{d\theta_B}{dt} = F_R \frac{dx_B}{dt} \quad or \quad T_R = F_R L \quad (7)$$

최종적으로 다음과 같이 모터토크와 램본체 이송거리간의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$T_M(t) = \frac{J_{MB} + M_R L^2}{L} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{D_{MB} + B_R L^2}{L} \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

위 식을 라플라스 변환하여 전달함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{x(s)}{T_M(s)} = \frac{1}{\frac{J_{MB}+M_RL^2}{L}s^2+\frac{D_{MB}+B_RL^2}{L}s} \quad (9)$$

2.1.2 백래시를 고려하는 경우

백래시를 다음과 같이 시간지연으로 표현한다.

$$T_M(t) = 0 \quad \text{if } t < t_d$$
$$= T(t-t_d) \quad \text{if } t \geq t_d$$

위식을 라플라스 변환하면 $T_M(s) = e^{-t_d s}T(s)$이며, 식 (9)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{x(s)}{T(s)} = \frac{e^{-t_d s}}{\frac{J_{MB}+M_RL^2}{L}s^2+\frac{D_{MB}+B_RL^2}{L}s} \quad (10)$$

2.2 램집합체 모형제작

램집합체의 모형 설계의 기본방향은 램집합체 고유의 특성을 잃지 않으면서 간단한 구조를 가지도록 하고, 가능한 모든 이상상황을 임의로 발생시킬 수 있게 제작하는 것이다. 선행조사에 따르면 램집합체에 발생하는 주된 이상현상은 다음과 같이 정리할 수 있다.

가. 램집합체와 구동력전달부사이의 압력경계를 유지하는 Seal부분에 이상현상이 발생하여 이곳을 관통하는 볼스크류에 강한 마찰력이 가해져 회전에 이상현상발생.

나. 램집합체의 전후진 운동으로 인해 볼스크류에 가해지는 하중의 변화로 볼스크류의 회전에 이상 발생.

다. 볼넛 내부의 볼의 파괴 등으로 인한 볼넛이 Stick되는 현상

라. 볼스크류 자체의 백래시로 인한 측정거리와 실제이동거리의 불일치

램집합체 모형을 간단한 구조로 구성하기 위해 연구대상램을 유압모터로 구동되며, 긴 스트로크(stroke)를 가지고 있는 B-램으로 한정하였다. L-램은 B-램과 같은 구조의 구동시스템을 가지고 있으나 총 이동거리가 3.35cm에 불과하여 이상상황 발생 가능성이 상대적으로 적고, C-램은 중수압에 의해 구동되므로 위에서 살펴본 이상상황 발생요인과 거리가 멀기 때문에 연구대상램에서 제외하였다.

그림 2는 완성된 램집합체 모형을 나타내고 있으며 표 1에 램집합체와 모형의 사양을 비교하여 나타내었다. 그림 2에서 보는 바와 같이 램집합체 모형은 크게 구동부와 이상상황 발생부, 그리고 제어부로 이루어져 있다. 이상상황을 나타내기 위해 볼넛에 가변하중을 장착하였고 유압실린더로 구동력에 반하는 마찰력을 만들어 낼 수 있다.

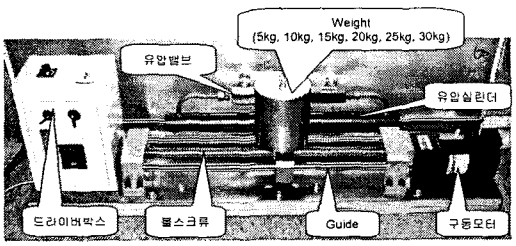

그림 2 램집합체 모형

2.2.1 각부설명

가. 볼스크류

볼스크류는 국내의 볼스크류 제작 여건상 1/2의 축척으로 스테인레스 스틸 재질로 제작하였다. 단, 실제 B-램의 경우 318cm를 이동하지만[1], 램집합체 모형에서는 이동거리는 중요치 않으므로 램의 이동거리는 50cm로 설정하여 볼스크류 유효부의 길이를 50cm로 제작하였다. 축척에 따라 볼스크류의 피치가 1/2로 줄었으므로 구동부에서는 실제 입력보다 속도가 2배가 되어야 하며 이러한 사항은 모터와 감속기의 선정에 반영되어 있다. 볼스크류 양측에는 볼스크류와 같은 재질의 가이드를 설치하여 기기의 안정적인 운영을 도모하였다.

표 1. 램집합체와 모형의 사양 비교

	램집합체	램집합체 모형
구동원	사축식 유압모터, 중수압	AC 인덕션모터
	최대속도 1200rpm 솔레노이드밸브에 의해 3단 변속 감속비 480:1	출력 60W 단상 220VAC/60Hz Reversible Motor with Helical Shaft 감속비 3:1
구동력전달 Mechanism	유성기어를 포함한 기어열방식	모터와 볼스크류를 직렬로 연결
Ballscrew	2 Thread per Inch, Right Hand 0.5in pitch length 1.7125in Ball Circle Diameter	4 Thread per Inch, Right Hand 0.25in pitch length 1.25in Ball Circle Diameter
Weight	램 자체의 하중 램의 전후진으로 인해 볼스크류에 가해지는 하중이 변화됨	볼넛에 가변하중을 인가하여 램의 하중변화를 표현
Backlash	볼스크류의 특성상 발생하는 백래시	볼스크류의 특성상 발생하는 백래시
Friction	램하우징의 Seal부분 이상 시 발생	볼넛에 연결된 유압실린더의 압력을 조절하여 발생시킴
속도조절	고속/중속/저속 3단계 속도 선택	고속/저속 2단계 속도 선택
램이동거리	B-램의 경우 318cm	50cm
거리측정	모터축에 연결된 Rotary Potentiometer	볼넛에 연결된 Linear Potentiometer

나. 유압실린더

유압실린더는 램하우징과 동력전달부와의 압력경계에 있는 Seal부의 이상으로 발생할 수 있는 마찰력을 모의하기 위한 장비이며 구조는 그림 3과 같다.

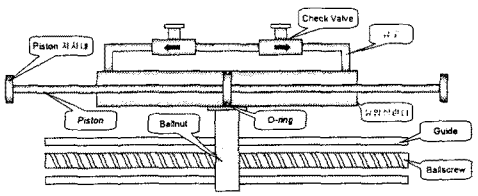

그림 3 유압실린더 구조

유압실린더 내부에는 Oil이 채워져 있으며 한가운데 O-ring이 부착된 디스크를 장착한 피스톤을 포함한다. 유압실린더 외부로 설치된 유로에는 2개의 각기 다른 방향성을 가진 Check Valve가 부착되어 있으며 각 방향으로 마찰력을 변화시키는데 사용되므로 램의 전후진시에 발생할 수 있는 마찰력의 증감을 표현할 수 있다.

다. 부가하중

램집합체는 전후진 운동을 하면서 볼스크류에 인가되는 하중이 변한다. B-램이 최대 전진하였을 때 볼넛은 볼스크류의 거의 끝단에 위치하게 되고 그렇게 되면 램집합체의 하중이 볼스크류의 말단으로 집중되게 된다. 이러한 현상을 표현하기 위해 모형에서는 볼넛 상부의

가이드에 하중을 끼워 올려놓을 수 있도록 하였다. 하중은 운전시 흔들림이 없도록 정밀하게 가공되었으며, 5kg, 10kg, 15kg 세가지 무게의 하중이 제작되었다. 하중은 서로 조합하여 장착할 수 있어 최소 5kg에서 최대 30kg까지 다양한 하중으로 실험 할 수 있다.

라. 모터 및 감속기

램집합체는 구동원으로 유압모터와 중수압을 사용한다. 이중 B-램과 L-램은 유압모터를, C-램은 중수압을 이용하여 구동된다. 본 과제에서는 상대적으로 이상현상 발생확률이 높은 B-램과 L-램을 연구대상으로 선정한다. 유압모터는 구동원인 유압을 발생시키기 위해 유압펌프 및 밸브 등의 부가장비가 필요하므로 램집합체에서 사용하는 유압모터와 동급의 성능을 보이는 AC인덕션모터(AC Induction Motor)로 대체하였다.

마. 거리측정센서

모터축에 장착되는 엔코더나 Potentiometer로는 백래시의 발생여부를 알 수 없으므로 볼넛의 이동거리를 측정할 수 있는 Linear Potentiometer를 장착하였다. Linear Potentiometer는 내부에 회전형 Potentiom--eter와 와이어, 그리고 와이어 드럼으로 구성되어 있으며 와이어의 직선운동이 드럼에 의해 회전운동으로 변환되어 회전형 Potentiometer에서 이를 측정하는 원리이다.

2.3 실험

2.3.1 현장데이터

본 연구에서는 월성 1호기에서 유압모터에 의해 구동되어지는 B-램에 대한 운전 데이터를 취득하였다. 데이터를 취득한 결과는 그림 4와 같다. B-램의 행정은 램 구동 모터축에 취부된 Potentiometer에 의해서 측정하였으며, 가해지는 힘(토크)은 실제 현장에서 B-램에 대해서 줄 수 있는 5단계의 힘에 기반해 램 행정에 대해 대략적으로 정규화한 값을 유압의 변화에 따라 도시하였다. 실험 데이터를 보면 인가되는 토크에 따라 램 행정의 궤적의 기울기, 즉 속도가 변화됨을 볼 수 있다. 이 데이터에 기반해 2.1에서 언급한 모델링식의 계수들을 추정할 수 있게 된다.

2.3.1 램집합체 모형 데이터

본 연구에서 제작한 모형을 이용하여 실험한 데이터는 그림 5,6과 같다. 그림 5의 데이터는 하중(10Kg)을 인가하고, 유압실린더의 힘을 30 *Kgf*을 인가한 상태에서 속도 제어기의 설정치를 690rpm → 1590rpm → 690rpm으로 변화하면서 실험한 데이터이다. 그림 4의 현장데이터는 유압모터인 반면, 모형에서 채택한 모터는 AC 인덕션 모터로 속도가 증가함에 따라 토크가 감소됨을 볼 수 있다. 그림 5의 데이터는 토크에 따라 램의 행정의 속도가 변화됨을 볼 수 있다. 토크는 전압과 전류, 그리고 각속도로부터 계산한 값을 이용하였다. 그림 6의 데이터는 데이터는 하중(10Kg)을 인가하고, 유압실린더의 힘을 30 *Kgf*을 인가한 상태에서 속도 제어기의 설정치를 690rpm → 1590rpm으로 변화시킨 후 유압실린더의 힘을 30 *Kgf* → 38 *Kgf*으로 변화시켰을 때의 데이터를 보여준다. 유압 실린더의 힘의 변화는 2.2에서 언급한 램 집합체에 발생하는 주된 이상현상인 램집합체와 구동력 전달부사이의 압력 경계를 유지하는 Seal 부분에 이상현상이 발생하여 이곳을 관통하는 볼스크류에 강한 마찰력이 가해져 회전에 이상이 발생하는 현상을 모의한다. 유압 실린더의 힘의 변화에 의해 램 행정의 기울기, 즉 속도가 변화됨을 볼 수 있다. 이런 방법으로 램 집합체 이상 현상을 모의할 수 있으며, 그에 따른 시스템의 동작을 해석하여 고장진단을 할 수 있으리라 본다.

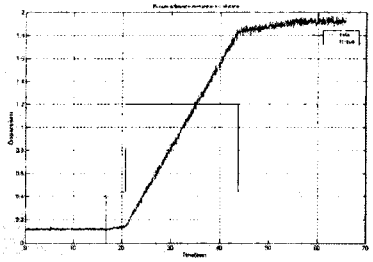

그림 4 B-램에 대한 월성 현장 데이터

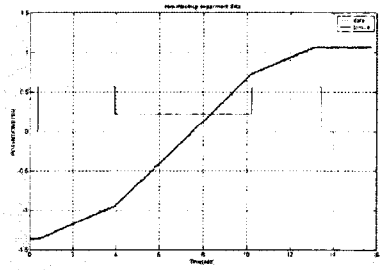

그림 5 제작 모형에 의한 실험 데이터

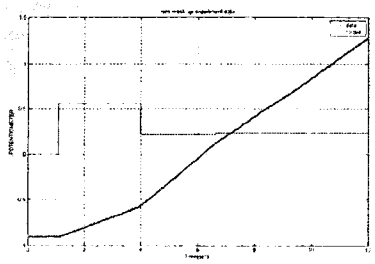

그림 6 제작 모형에 의한 외란을 준 실험 데이터

3. 결 론

본 논문에서는 중수로 핵연료교환기 램집합체의 시스템 모델링을 수행하고, 램집합체 모형(Mock Up)의 설계 제작에 관하여 다루었다. 램집합체 모형은 램집합체의 운동특성을 나타내주고 있으며 램집합체에 발생할 수 있는 여러 이상상황을 임의로 재현할 수 있으므로 램집합체 운동방정식의 계수추정을 통해 램집합체 On-Line 감시시스템 구성을 위한 신호처리와 고장진단연구에서 활용할 수 있으리라 본다. 현재는 램집합체 모형의 신호를 측정하기 위하여 Linear Potentiometer를 이용하여 이동거리만을 측정하였지만 향후 힘센서, 진동(음향)센서 등의 각종 센서를 활용하여 다양한 신호를 측정하고, 측정된 신호처리 방법에 관하여 연구할 계획이다. 아울러 신호처리결과를 바탕으로 고장진단방법에 관한 연구를 수행할 계획이다.

[참 고 문 헌]

[1] 한국전력공사 월성원자력본부, "중수로핵연료 교환설비", 상권, pp.79-122.

[2] Benjamin C Kuo, "Automatic Control System", 5th Edition, pp.118-136, 1988

[3] 김종대,조병학,김준홍,신창훈,김석곤, "중수로 핵연료 교환기 램집합체 시스템의 운동특성 해석 및 시스템 식별", 2001 한국원자력학회 추계학술발표회 vol.2.