

## 차폐문 이상 진단 시스템 개발 연구

### Development of a diagnostic system for a shielding door

채장범, 김태환

아주대학교

경기도 수원시 영통구 원천동 산 5

홍순성, 서언식, 박완규

한수원(주) 월성원자력본부

경상북도 경주시 양남면 나아리 260

#### 요 약

중수로 원자력발전소에서 원자로실과 보수실사이의 방사선을 차폐하는데 사용되는 차폐문의 작동 상태를 감시하고 결함을 진단하는 방법을 연구하였다. 고방사선 구역에서 작동하는 차폐문에 대한 신호의 취득은 원격에서 비침투적으로 이뤄져야하는 제약을 갖고 있다. 따라서 비침투적으로 원격에서 측정 가능한 신호들로서 전압과 전류가 선정되었고 선정된 신호를 이용하여 정확한 진단을 위해 필요한 진단 신호를 추출하였다. 그리고 진단 신호의 타당성을 설계 제작한 모형 차폐문을 대상으로 다양한 실험을 수행하여 검증하였다.

#### Abstract

Diagnostic algorithms are developed, which will be utilized to monitor the condition of and to diagnose defects in a shielding door, in PHWR(Pressurized Heavy Water Reactor). Since the shielding door operates in the high radiation area, it is impossible to give direct access to it for measuring the signals. Therefore, input currents and voltages of an electric motor, which can be acquired remotely and non-invasively, were selected as the measuring variables. The measured signals are further processed to extract the diagnostic signatures. They were examined and validated in the various experiments with the shielding door simulator.

## 1. 서론

중수로 원자력발전소 원자로실의 차폐문은 원자로실과 보수실을 격리 및 차폐하는 역할을 수행한다. 거의 매일 일정량의 연료를 교체해 주어야 하는 중수로 원전에서 차폐문은 핵연료 교환 작업 전·후에 작동되어야 하는 매우 중요한 설비이다. 차폐문은 핵연료 교체 시를 제외하고는 적절한 위치에서 평상시에 닫혀있어야만 한다. 차폐문은 항상 고방사선에 노출되어 있으며, 특히 구동부가 원자로실 쪽에 위치하고 있어 가동 중에는 차폐문의 상태를 직접 파악할 수 있는 방법이 없다. 만약 차폐문의 작동이 실패하여 정지하게 되면 차폐문은 고방사선 구역에 있으므로 보수를 위해서 발전소를 정지시켜야 하는 경우가 발생하게 된다. 따라서 가동 중 차폐문의 상태 및 성능 저하를 파악하여 고장을 미연에 방지할 수 있는 기술이 요구되어 왔다. 그러나 중수로 원전을 다수 확보하고 있는 캐나다에서조차 차폐문을 작동 중에 진단하는 기술을 확보하지 못하고 있고, 오버홀 기간 중 운할 상태 점검 및 구동부품에 대한 조정 등의 보수 정비에 그치고 있다. 그러나 이와 같은 점검만으로는 가동 중 점차적으로 성능이 저하되어 발생할 수 있는 고장을 미리 예측하기란 불가능하고, 갑작스런 상태 변화를 감지할 수는 없다. 따라서 차폐문을 변형시키지 않고 비침투적으로 원격에서 신호를 측정하여 가동중 차폐문의 상태를 진단을 수행할 수 있는 방법의 개발이 이루어져야 한다. 이번 연구에서는 비침투적으로 측정이 가능한 신호인 차폐문 구동 모터의 전압과 전류만을 원격에서 측정하여 차폐문의 상태를 파악하기 위한 진단 신호를 구성하였고, 모형 차폐문의 작동 실험을 통하여 진단 신호의 타당성을 검증하여 차폐문의 가동 중 감시에 이용될 수 있음을 증명하였다.

## 2. 차폐문 모형<sup>1)</sup>

차폐문은 보수 트랙과 원자로사이에 위치한다. 그림 1에 차폐문과 원자로의 배치도를 나타내었고, 원자로 양측에 차폐문이 각각 설치되어 핵연료교환을 위해 모두 열려있는 장면을 나타내고 있다. 그림 2는 현장의 차폐문을 간략하게 도시한 것으로 2개의 직렬 배열된 대차들은 차폐문의 중량을 지지한 채로 원자로 바닥의 홈 내부의 2개로 분리된 레일 위에서 움직인다. 그림 3은 차폐문의 대차를 전면과 측면의 모습을 나타낸 것이다. 차폐문의 주요 부품은 원자로 측에 위치하므로 원자로가 가동 중인 경우에 차폐문은 항상 방사선에 노출되므로 현장 차폐문을 원자로실에서 작동하면서 연구 목적으로 신호를 측정한다는 것은 원자력 발전소 운영상 어렵고, 고장 메커니즘을 구현하여 실험한다는 것은 불가능하다. 이에 본 연구에서는 실제 차폐문의 작동 상태를 파악하기 위한 방법을 도출하기 위해 실제 차폐문의 특성을 재현해낼 수 있는 차폐문 모형을 설계 및 제작하였다.

차폐문 모형 제작은 오작동이 예상되는 부분들을 포함하고, 실제 구동시스템과 동일한 시스템을 갖도록 제작되었다. 또한 설치장소의 크기가 제한되어 있으므로 실제 차폐문을 축소하여 모형을 제작하였다. 본 연구과정에서 제작된 차폐문 모형은 그림 4와 그림 5에

도시된 바와 같이 대차 구동부, 문 집합체에 해당하는 구조물과 부하 부분, 상·하부지지 레일 및 가이드, 제어반 등으로 구성되었다. 차폐문의 구동부는 전기 모터에 의해 구동되며, 플렉시블 커플링, 헬리컬 워임 감속기, 토크 리미터, 피니언-링기어, 바퀴 순으로 동력이 전달된다. 출력축에서 회전이 용이하도록 제작된 헬리컬 워임감속기는 2개의 기어 세트가 조립된 것으로 구동 토크를 증대시키고, 회전축 방향을 바꿔주는 역할을 한다. 또 토크 리미터는 전달되는 토크 값을 조절하여 구동 기구의 손상을 방지하고, 정지 시 차폐문이 충격흡수용 버퍼에 가하는 힘을 제한하게 된다. 차폐문에는 제동장치가 없으며 구동 모터에 공급되는 전원은 이동 구간에서 미리 설정된 지점에 이르면 리밋스위치에 의해 중단되고 문은 미끄러져 정지하게 된다. 차폐문 구조물의 중량은 부하를 포함하여 약 3톤으로 제작되었다. 모형의 하부지지 레일은 2개로 분리된 한 조로 구성되어 현장의 레일과 동일한 형태를 이루고 있다. 모형 운전에 필요한 제어반은 현장과 동일한 운전 모드를 구현할 수 있도록 제작하였다. 이는 대차 2대를 동시에 구동시키거나 대차 2대 중 1대만을 구동시켜 문을 닫고 열수 있도록 한 것이다. 필요한 신호를 추출하기 위해 사용되는 센서들 즉, 엔코더, LVDT 등을 설치할 수 있는 고정부가 제작되어 설치되었다.

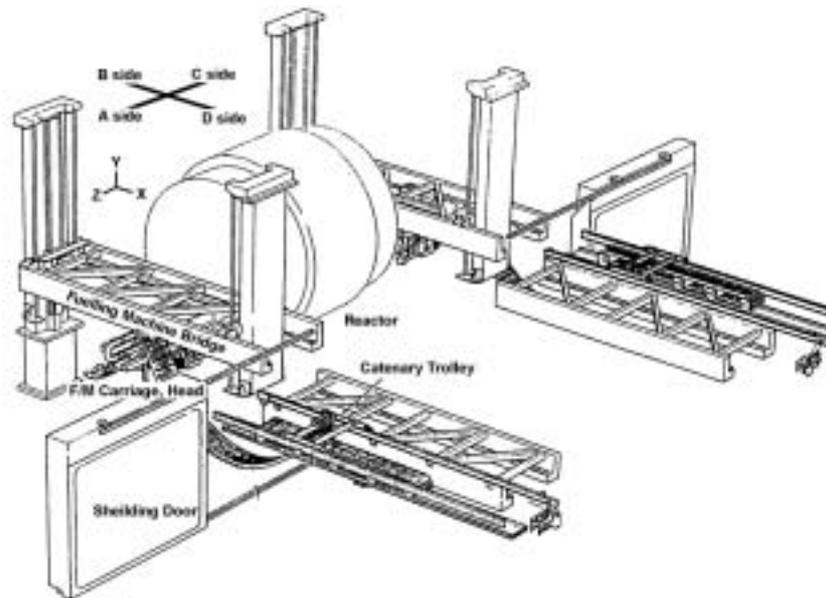


그림 1 중수로 원전의 원자로와 차폐문

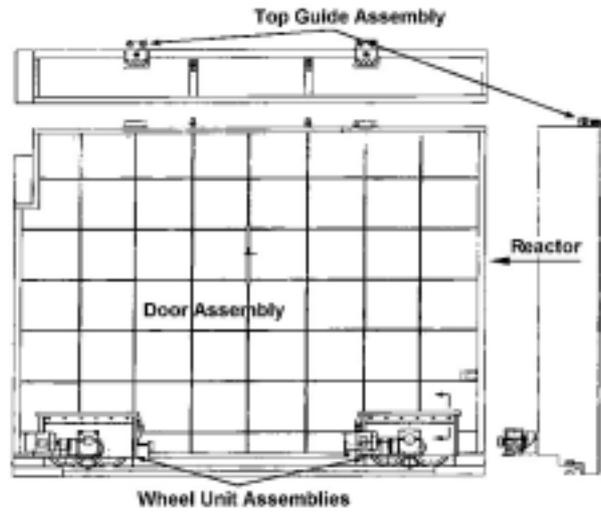


그림 2 원자력발전소 차폐문 전면도

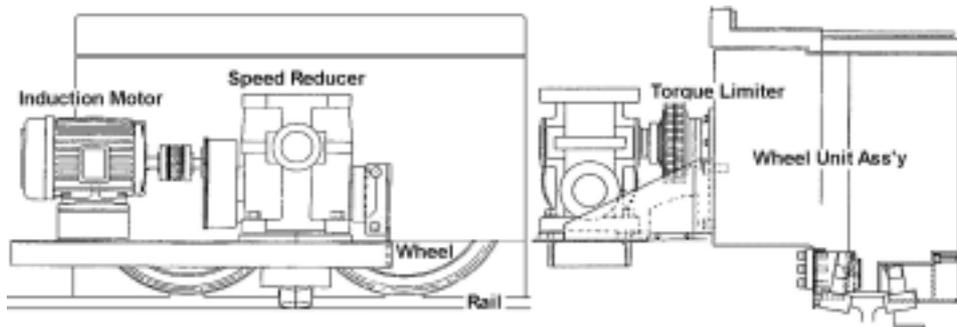


그림 3 현장 차폐문 대차부 개략도



그림 4 차폐문 모형

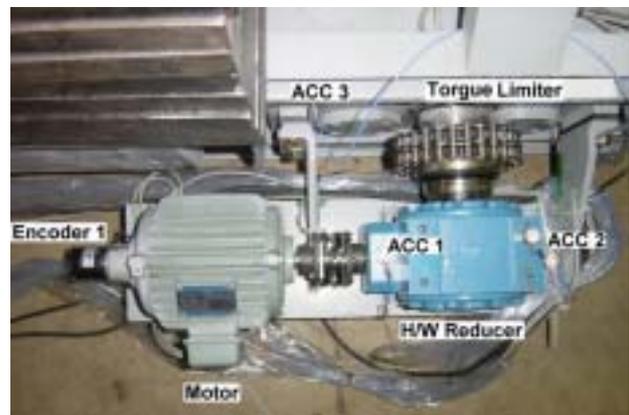


그림 5 차폐문 모형 구동부

### 3. 신호처리기법

토크는 회전 구동 시스템의 부하에 비례하므로 동력상태를 가장 잘 보여줄 수 있는 신호이다. 따라서 차폐문의 구동원인 전기 모터의 출력 토크는 차폐문 상태를 진단하기 위해 가장 적절한 변수이다. 토크는 부하에 비례하므로 작동 시 차폐문에 작용하는 부하의 변화를 파악할 수 있고, 연결된 구동 부품들의 상태도 추출해 낼 수 있다. 일반적으로 토크는 관심 있는 부분에 힘 센서를 적절히 설치하거나, 토크 센서를 구동 부품 사이에 삽입함으로써 가능하다. 그러나 원전설비인 차폐문의 경우에는 신호 측정을 위하여 구조를 변경하는 것이 허용되지 않으므로 모터 토크를 얻기 위해서는 신호의 측정이 반드시 비침투적인 방법으로 이루어져야 한다. 이로 인해 본 연구에서는 비침투적으로 측정이 가능한 전기 모터의 입력 전압과 전류를 측정 신호로서 선정하였고, 이를 이용하여 검출된 모터 토크를 진단 신호로 사용하였다. 전기 모터에 공급된 전압과 전류 신호로부터 모터 토크를 검출하는 방법을 살펴보도록 하겠다. 모터의 입력 전압과 전류를 이용하여 모터 토크를 검출해내기 위해서는 모터의 작동 원리를 이용하여 전압과 전류로부터 토크를 계산하는 식을 유도한다.<sup>2) 3)</sup> 모터의 출력 토크 수식은 몇 가지 가정들을 바탕으로 되었다.

첫째, 고정자(stator) 권선은 sine곡선으로 감겨 있어, 공극자속이 fundamental-space-harmonic 성분으로만 결합되어 있다.

둘째, 회전자(rotor) 권선의 자기 인덕턴스는 회전자의 각 변위에 따라 변하지 않는다.

셋째, 모터 코어의 손실은 무시하고, 선형 자기라 가정한다.

측정된 3상의 전류와 전압 신호는 계산의 편의를 위하여 먼저 2상의 신호로 변환된다. 변환식은 (1)에 나타나있다.

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\cos \frac{2\pi}{3} & -\cos \frac{2\pi}{3} \\ 0 & \cos \frac{1}{6} \pi & -\cos \frac{1}{6} \pi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

$X_A, X_B, X_C$  : 3상 전압, 전류 또는 자속 링크수

$x_a, x_b$  : 2상 전압, 전류 또는 자속 링크수

2상 모터에 대해 자속-전류 관계는 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_S \\ \lambda_R \end{bmatrix} = [L] \cdot \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} \quad (2)$$

토크는 에너지 방법(energy method)으로부터 쉽게 유도될 수 있다. 보에너지(coenergy)

는

$$W = \frac{1}{2} [ i_S^T \ i_R^T ] [ L ] \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

이다. 여기서 윗첨자 T는 전치행렬(transpose)을 의미한다. 전기적인 토크는 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$T = \frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{1}{2} [ i_S^T \ i_R^T ] \left[ \frac{dL}{d\theta} \right] \begin{bmatrix} i_S \\ i_R \end{bmatrix} \quad (4)$$

일련의 대수 계산을 통하면 최종적으로 전기적인 토크는 다음 관계식과 같이 구해진다.

$$T = P(\lambda_{Sa} i_{Sb} - \lambda_{Sb} i_{Sa}) \quad (5)$$

여기서 P는 모터의 극수,  $\lambda_{Sa}$ 와  $\lambda_{Sb}$ 는 각각 a와 b상의 고정자 권선 자속 링크수,  $i_{Sa}$ 와  $i_{Sb}$ 는 a와 b상의 전류이다.

#### 4. 실험

진단 신호로 선정된 모터의 출력 토크의 타당성과 이를 이용한 차폐문 진단 방법을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 원전에서 운전하는 차폐문의 상태를 모사하기 위한 모형을 구성하였으며, 이를 대상으로 다양한 실험을 수행하였다. 또한 모형 실험 결과에 대한 검증을 위해 가능한 다양한 운전 모드에서 현장 실험을 실시하였다. 각종 물리량들을 측정하기 위하여 전류계, 전압계, 가속도계, LVDT, 엔코더 등이 실험에 사용되었다. 모터 토크 검출에 이용될 전류, 전압은 전류계와 전압계를 차폐문 모형 운전을 위해 제작된 콘트롤 패널에 설치하여 측정하였다. 전류와 전압의 측정 채널은 총 12개로 대차 2대의 전기모터에 각각 공급되는 3상에 대해 측정되었다. 그림 4와 그림 5는 차폐문 모형의 사진을 나타낸 것으로 모형의 형태와 센서가 부착된 상태를 확인할 수 있다. 정확한 위치를 측정하기 위해 차폐문 후미에 LVDT를 설치하였고, 모터 축과 바퀴축에 엔코더를 연결하여 회전량을 측정하였다. 위 신호들은 데이터 수집 장치를 이용하여 동시에 취득하였다. 측정된 각종 센서에서 취득된 신호들은 차폐문 진단의 정확성을 확인하기 위해 사용되었다. 본 연구에서 수행된 내용 중에서 논문에 언급된 것은 차

폐문 반복 운전 실험, 초기 구간 슬립 발생 실험, 동력전달 상태 변화 실험, 토크리미터 조립 불량 실험, 리밋스위치 설정 변화 실험이며, 검출된 모터 토크 진단 신호를 기준으로 실험 결과를 해석하였다.

#### 4.1 차폐문 반복 운전 실험

차폐문의 운할 및 운전빈도에 따른 구동 모터 토크의 변화를 관찰하였다. 원전 현장과 모형 차폐문에 대해 닫힘 또는 열림 방향으로 모터 1대만을 구동시키거나, 모터 2대를 동시에 구동시키면서 데이터를 측정하였다.

#### 4.2 초기 구간 슬립 발생 실험

차폐문 운전 시 모터 1대로 구동하는 경우의 운전 시간과 모터 2대로 운전하는 경우의 운전시간이 차이를 보였으며, 모터 1대로 구동하는 경우에도 운전 시간의 차이가 발생하였다. 이는 모터에 부하가 증가되면 속도가 저하되어 발생하는 현상이기도 하고, 슬립에 의한 현상이기도 하다. 모터 1대로 구동시키는 경우 차폐문을 움직이기 위해 구동되지 않는 모터측 워엄속속기를 역회전시키기 위한 회전력을 추가로 공급해야 하기 때문에 차폐문 운전에 소요되는 부하는 증가하게 된다. 따라서 모터의 속도가 저하되고 토크리미터의 설정에 따라 슬립 또한 증가하게 된다. 이에 상당한 시간 동안 초기 슬립이 발생한 현장의 경우와 유사한 상태를 만들기 위해 토크리미터 설정값을 낮추어 모형 실험을 수행하였다.

#### 4.3 토크리미터 조립 불량 실험

토크리미터 전달 토크는 축을 중심으로 120도씩 배열되어 있는 3개의 조정 나사를 죄거나 풀어 조정한다. 이때 초기 설정 시 또는 운전 중에 3개의 조정 나사의 조절량이 변화하게 되는 경우 마찰판의 이상마모를 일으켜 급격한 마찰판 노화를 일으킬 수 있다. 이와 같은 현상을 진단 신호인 모터 토크 신호를 이용하여 감시할 수 있는지를 살펴보기 위해서, 3개의 나사중 하나를 과도하게 조이고, 나머지 2개 나사를 덜 조인 후, 정상적으로 토크리미터가 조립된 실험에서 얻은 토크 신호와 비교하였다.

#### 4.4 리밋스위치 설정 변화 실험

현장에 설치되어 있는 리밋스위치는 위치와 레버 각도를 조정하여 설정하도록 되어 있다. 레버의 회전 동작으로 차폐문의 구동 모터에 대한 전원 공급이 중단되며, 이후 관성에 의한 움직임으로 버퍼까지 운전된다. 따라서 리밋스위치 설정이 정해진 시점이나 지점보다 먼저 작동하게 되면, 차폐문은 원하는 위치까지 도달하지 못하게 되고, 이후에 작동하게 되면 차폐문이 버퍼에 부딪히게 되므로 차폐문에 불필요한 충격을 가하게 되며, 차폐문 안전 운전에도 악영향을 끼치게 된다. 따라서 리밋스위치가 원하는 초기

설정과 같이 작동하고 있는 지를 확인하는 것은 매우 중요하다. 이 실험에서는 모형의 리밋스위치의 위치를 진행방향으로 이동시킨 후 실험을 수행하였고, 이때 리밋스위치를 작동하지 않도록 하여 차폐문을 버퍼에 접촉시킨 후 모터에 전원을 계속 공급하였다. 또한 현장에서는 리밋스위치 작동이 실패한 이후 버퍼까지 차폐문이 운전된 경우의 실험 데이터를 취득하였다.

## 5. 실험 결과 및 해석

### 5.1 윤활 상태에 따른 토크 변화

모터 토크 신호가 차폐문의 윤활 상태를 반영할 수 있는 지를 관찰하기 위해 모형과 현장 실험을 통해 토크의 변화를 시간에 따라 구하였으며, 이중 현장 실험 결과를 그림 6에 나타내었다. 6월 5일자(녹색, 파란색) 시험은 단힘 운전의 반복에 따라 모터 토크가 약간씩 감소하고 있음을 그래프를 통해 알 수 있다. 이는 정비 후에 윤활의 상태가 아직 정상 상태를 이루지 못하여 운전이 반복될 때마다 윤활의 상태가 정상 상태로 수렴하는 현상을 보여준다. 두 번의 반복 행정으로는 정상상태에 도달하지 못하고 사용을 계속적으로 함으로써 윤활의 상태는 정상 상태가 된다. 따라서 9월 4일에 구한 토크 신호는 그 크기가 보다 작아진 것을 알 수 있다. 그러나 만일 작동 중에 내부의 다른 결함이 생겼다면 부하의 곡선은 수렴하지 못하고 변하게 되는데 그림에서 알 수 있듯이 현장의 차폐문 상태는 정상 상태로 수렴한 좋은 상태를 보여준다. 또한 진단 신호로서의 모터 토크 신호가 매우 뛰어난 재현성을 가지고 있음을 증명하였다. 본 실험을 통해 차폐문의 윤활 상태를 모터 토크 크기의 변화로서 파악할 수 있었다.

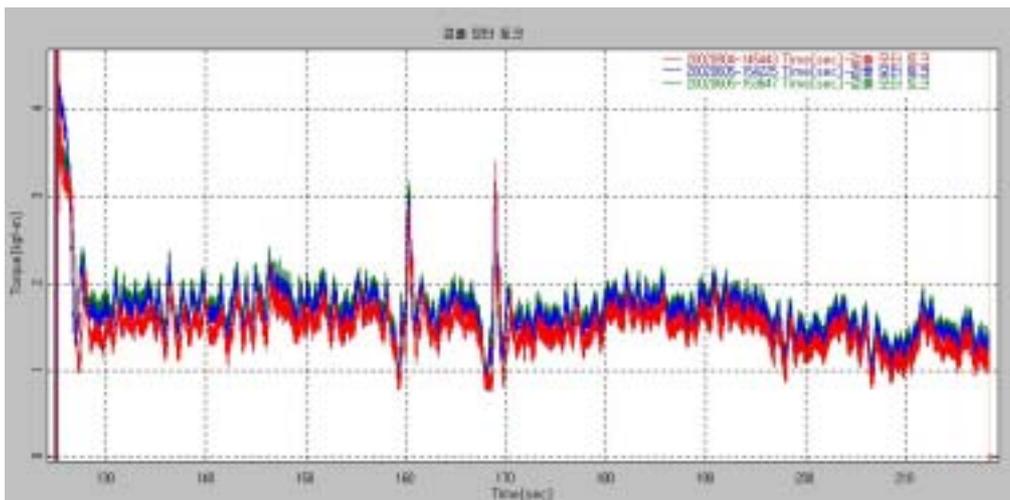


그림 6 모터 1대 구동 시 검출된 토크 신호(현장)

## 5.2 토크리미터 성능 평가 및 차폐문 운전 여유도

그림 7은 그림 6의 실험 대상과는 다른 위치에 설치된 차폐문에 대한 실험 결과로 모터 하나만으로 2회(녹색-빨간색) 연속 운전을 수행한 실험에서 구한 토크 데이터를 일정한 점에 맞추어 정렬한 상태이다. 초기 운전 시 약 30초 동안 토크리미터에서 슬립이 발생하였다. 두 번째 운전에서는 슬립 구간이 짧아져 운전이 반복됨에 따라 구동부품과 윤활 상태의 안정화가 이루어졌음을 알 수 있다. 초기 슬립 구간 이후 정속 운전 구간에서 두 모터 토크의 형태 및 크기는 거의 동일해졌다. 또한 초기 슬립구간에서의 모터 토크 값은 유사하다. 그림 8에서 녹색은 모터 2대로 운전된 시험에서 얻은 대차 1번 모터의 토크 신호이고, 파란색은 대차 1번 모터로 구동된 시험의 토크 신호이며, 빨간색은 토크리미터 전달 토크를 작게 설정하여 모터 1대로만 운전된 대차 1번 모터의 토크 신호로 비교의 편의를 위해 -1 만큼 하향시켜 도시하였다. 위의 세 경우 모두 초기에 토크리미터의 슬립이 발생하였으나, 그 구간의 길이는 각각 다르다.

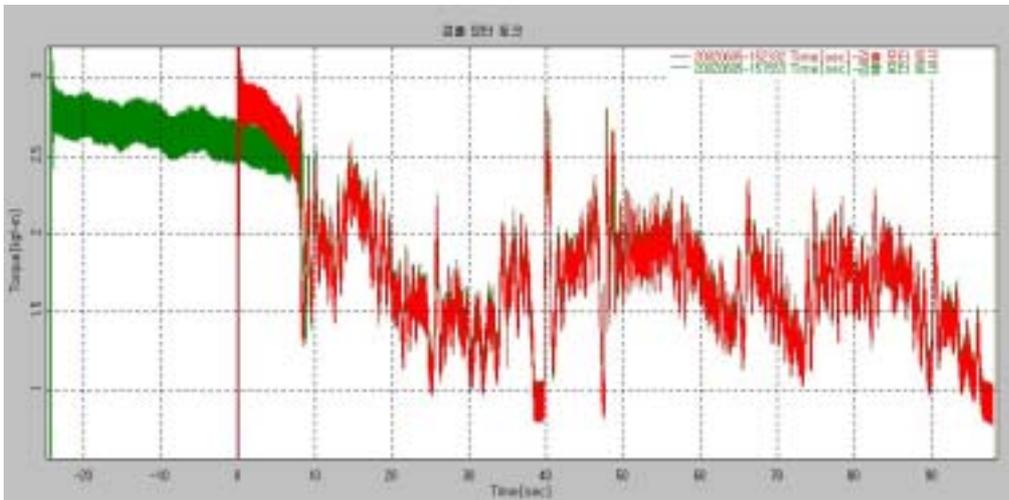


그림 7 모터 1대 구동 시 검출된 토크 신호(현장, 초기 슬립 발생)

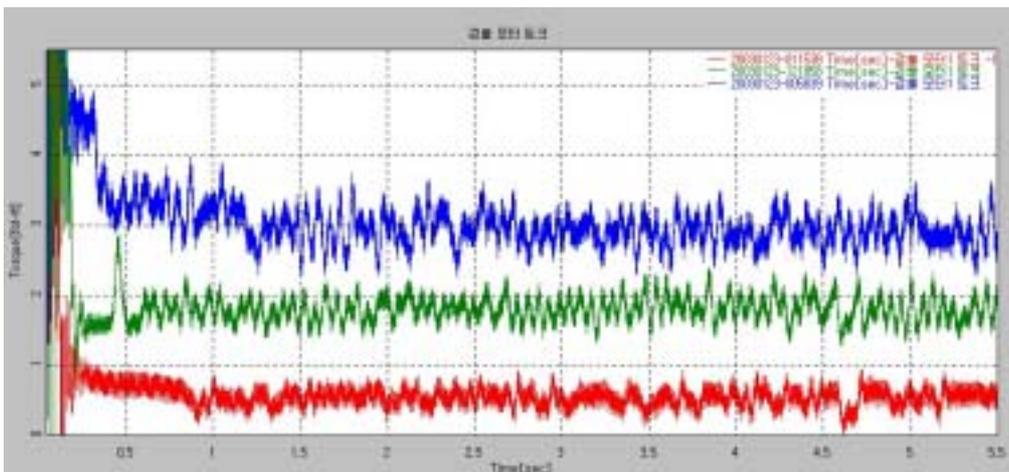


그림 8 구동 모터 개수 및 토크리미터 설정 변화에 대한 토크 신호(모형)

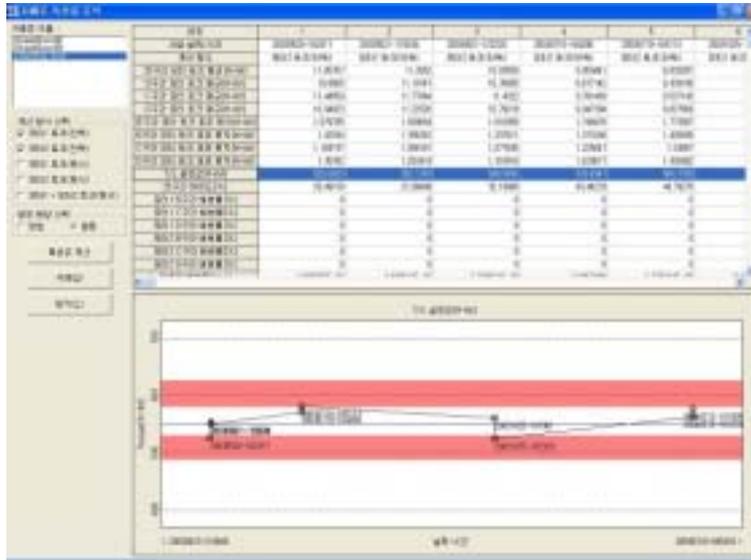


그림 9 토크리미터 설정값 변화(현장)

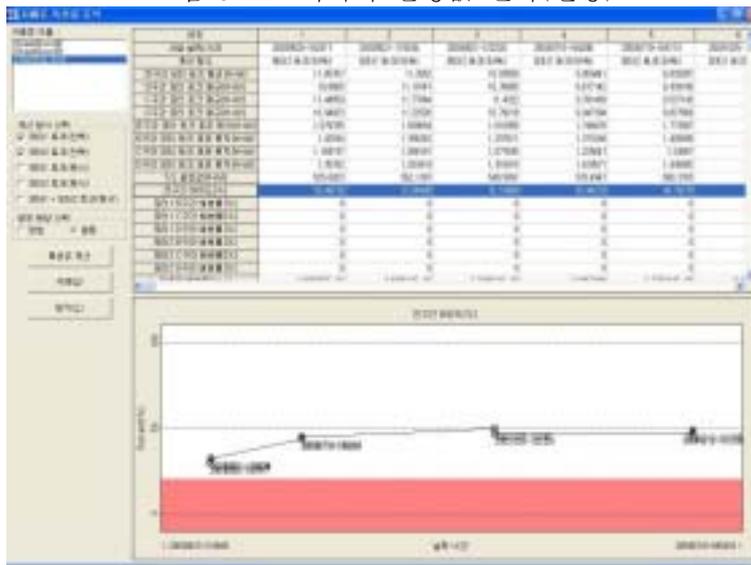


그림 10 전구간 운전 여유도 변화(현장)

두 개로 구동된 경우, 정속 운전까지의 구간이 가장 짧고, 토크 크기가 모터 1대로 정상적으로 구동된 토크에 비해 작다. 다음으로 모터 1대로 구동시킨 경우에 중동축 대차가 부하로 작용하여 그 토크의 크기가 2개로 구동한 경우에 비해 크고, 초기 슬립 시간도 늘어났다. 마지막으로 토크리미터 용량이 낮게 설정된 시험의 초기 슬립 구간이 가장 길었다. 또한 운전 중의 모터 토크 크기는 슬립 구간에서의 토크 크기와 큰 차이가 나지 않아 간헐적인 토크리미터에서의 슬립이 발생하였다.

이와 같은 슬립의 발생위치는 모터 2대 구동 시 얻은 모터토크(녹색)와 비교하면 기어

맞물림 시 나타나는 토크 신호 형태의 존재 여부로부터 알 수 있다. 그리고, 토크리미터 설정값 저하 전(파란색)과 후(빨간색)를 비교함으로써 또 하나의 중요한 정보를 얻을 수 있는데, 운전 구간과 슬립 구간에서의 토크 값의 차이이다. 토크리미터의 설정값을 저하시킨 경우 운전구간과 슬립구간의 차이가 정상적인 경우에 비해 현저하게 줄어들었다. 또한 운전 중 지속적인 슬립이 발생하게 되어 차폐문 안전 운전에 악영향을 끼치게 된다. 본 실험으로부터 차폐문 운전 초기에 나타나는 슬립구간에서 토크리미터의 설정값의 변화에 대한 정보를 얻을 수 있고, 초기 슬립구간과 운전구간의 토크값 관계로부터 운전 상태의 안전성에 대한 척도를 제시할 수 있다. 그림 9와 그림 10은 현장 차폐문에 대한 주기적인 실험을 통해 얻은 토크리미터 설정값과 안전 여유도의 변화에 대해 연구에서 개발한 소프트웨어를 이용해 나타낸 화면으로 토크리미터 설정값은 일정하게 유지되고 있으며, 차폐문 운전이 안정화되어 안전 여유도가 일정한 값으로 수렴하고 있다.

### 5.3 토크리미터 조립불량에 따른 모터 토크 신호 변화

그림 11은 정상적인 조립 상태와 비정상적으로 조립된 토크리미터로 수행된 실험에서 얻은 모터 토크 신호들이다. 빨간색 토크 신호가 토크리미터 조정나사를 편중되도록 조인 후 얻은 데이터이다. 토크 신호의 형태를 비교하기에 용이하도록 절대값을 변경시켜 이동시켰다. 토크리미터의 조립 불량 상태에서 검출된 모터 토크 신호가 일정한 주기로 울렁거리고 있음을 알 수 있다. 이 주기는 토크리미터가 조립된 축의 1회전에 해당한다.

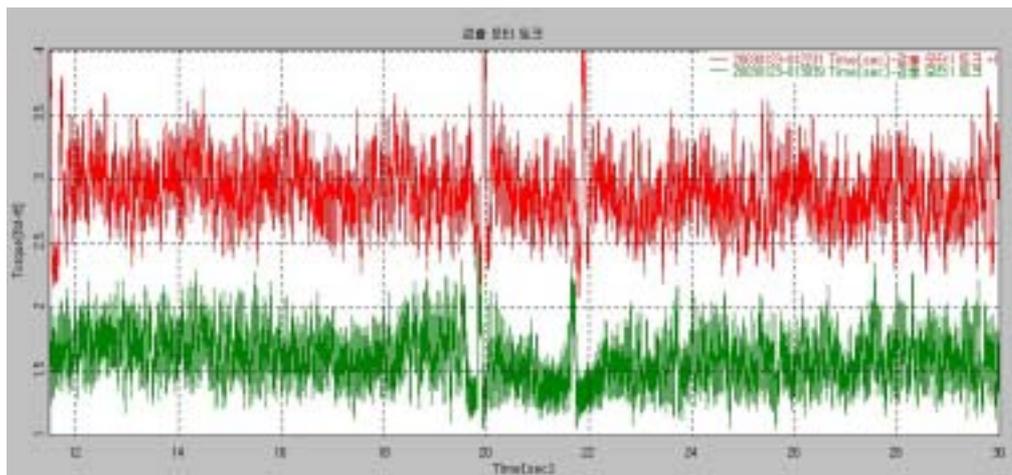


그림 11 토크리미터 조립상태에 대한 모터 토크 신호 변화

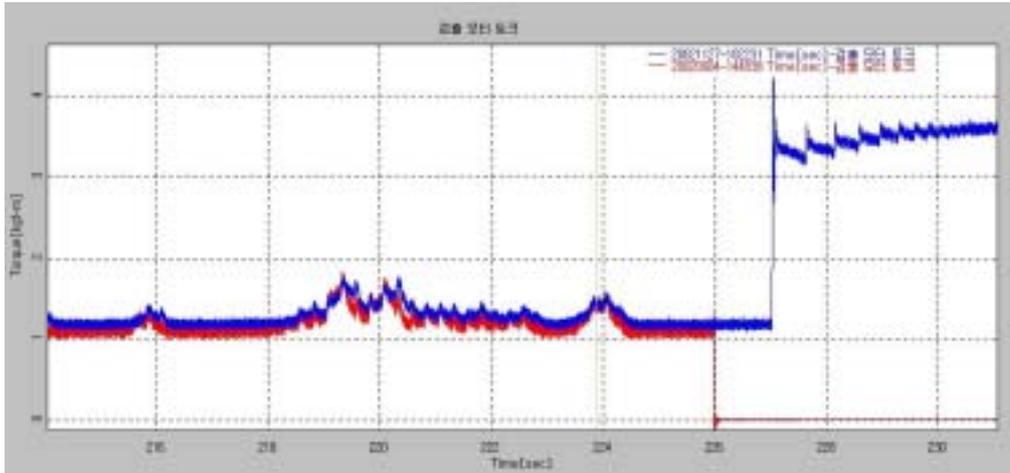


그림 12 리미트스위치 오작동 시 토크 신호와 정상 토크 신호 비교(현장)

#### 5.4 리미트스위치 설정 변화에 따른 모터 토크 신호의 변화

그림 12는 현장의 협조로 리미트스위치가 작동 실패한 경우의 실험을 수행한 것으로 모터 2대를 동시에 구동하여 운전을 수행한 것으로 리미트스위치의 오작동으로 인하여 버퍼까지 차폐문이 운전된 경우의 모터 토크 신호(파란색)와 정상적인 리미트스위치 작동 실험에서 얻은 모터 토크 신호(빨간색)를 동시에 그린 그래프이다. 정상 작동 구간에서의 토크 변화는 모두 동일하고, 리미트스위치의 설정에 변동이 발생하였더라도 약 226초 지점과 227초 지점의 중간에서 전원 공급이 중단된다면 버퍼에 차폐문이 닿아 모터에 무리한 충격 부하를 가하지 않도록 운전시킬 수 있다. 리미트스위치의 설정이 변경된다면 기준점 정렬을 통한 토크 신호를 비교하여 리미트스위치 설정의 변화를 감지할 수 있다. 또한 그림과 같이 기준점 정렬을 통한 시간 대 모터 토크 신호 그래프에서 226초 이전에서 리미트스위치가 작동하는 지를 감시하여 차폐문이 충분한 위치까지 이동한 후 작동하고 있는 지를 확인할 수 있다.

### 6. 결론

중수로 원전에 설치되어 사용되고 있는 차폐문에 대한 진단을 원격에서 비침투적으로 측정할 수 있는 신호로부터 진단 신호를 검출하였고, 진단 신호의 타당성을 실험을 통하여 검증하였다. 또한 발생 가능한 여러 가지 고장 및 작동 상태를 모형에 적용하여 실험을 수행하였고, 현장 데이터로부터 그 결과를 입증하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

진단 신호의 크기 변화를 이용하여 차폐문의 유효상태를 진단할 수 있으며, 초기구간과 정상속도 운전구간의 토크 크기의 관계로부터 토크리미터 설정값 변화와 안전 운전을 위한 여유 정도를 선정하여 관리할 수 있다. 또한 모터 토크의 변화 형태를 이용해 토크리미터의 조립 상태의 변화를 감지할 수 있었다. 마지막으로 정지 시 안전한 위치에서 차폐

문이 정지할 수 있도록 리밋스위치 작동 시점을 모터 토크 신호를 꾸준히 관리해야 한다는 결과를 얻었다.

위와 같이 차폐문의 특성과 진단에 필요한 진단 신호의 해석 방법 등이 연구되었으며, 최종적으로 차폐문 진단 시스템을 개발하는데 사용된다. 본 연구를 통해 상태 기반 관리를 위한 훌륭한 정보를 제공하여 보수 관리의 효율성을 높일 수 있으며, 궁극적으로 중수로 원자력 발전소의 안전성을 향상시키는 데에도 큰 역할을 담당할 수 있을 것이다.

## 7. 후기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기계획사업으로 수행되었습니다.

## 8. 참고 문헌

- 1) 한국전력공사, "중수로 핵연료 교환 설비", 1997
- 2) A.E. Fitzgerald, Stephen D.Umans, "Electric Machinery, 5th ed", McGraw-Hill, Inc., 1990
- 3) Jangbom Chai, "Non-invasive Diagnostics of Motor Operated Valves, Ph.D Thesis", MIT 1993