

핵연료 교환기 이상 진단 시스템 개발 연구

천정한*, 채장범*, °김태환**, 김윤철**, 김용배***, 홍순성****, 박완규****, 서연식****

Development of a Diagnostic System for a Fuelling Machine

Junghan Cheon, Jangbom Chai, Taehwan Kim, Yunchul Kim, Yongbae Kim, Soonseong Hong, Wankyu Park, Unsik Seo

ABSTRACT

본 논문에서는 중수로 원자력발전소에서 사용되는 핵연료 교환기 브리지의 상태를 감시하는데 필요한 진단 방법을 도출하였다. 핵연료 교환기는 고방사능 지역에서 작동하기 때문에 신호의 취득은 원격에서 비침투적으로 이뤄져야한다는 제약이 있다. 따라서 비침투적으로 원격에서 측정 가능한 신호들이 선정되었고 선정된 신호를 이용하여 정확한 진단을 위해서 필요한 여러 가지 진단 신호들의 장단점을 비교하였다. 진단 신호로는 모터의 출력 토크를 선정하였고 진단 신호의 타당성을 모형 브리지를 대상으로 수행한 실험을 통하여 검증하였다. 그리고 마지막으로 다양한 환경에서 실험을 하여 브리지의 작동 특성과 결함과 진단 신호와의 관계를 살펴보았다.

1. 서론

중수로 원자력발전소에 설치되어 있는 핵연료 교환기는 핵연료를 원자로에서 교환해 주는 연료 교환기 헤드와 이를 원하는 위치까지 이동시켜주는 브리지와 캐리지 등으로 구성된다. 이들은 매일 일정량의 연료를 교체해 주어야 하는 중수로 원전의 특성상 작동이 빈번한 기계들이다.1) 그런데 연료교환 작업에 필요한 핵연료 교환기의 작동이 실패하여 정지하게 되면 핵연료 교환기는 고방사능 지역에 있으므로 보수를 위하여 이와 같은 경우에는 발전소를 정지시켜야 하는 경우도 발생한다. 따라서 발전소 정지에 따른 경제적 손실을 야기하게 된다. 그러므로 지속적인 감시를 통하여 핵연료 교

환기의 상태를 파악하여 고장을 미리 방지하여야 한다는 요구는 계속되어 왔다. 그러나 중수로 원전을 다수 확보하고 있는 캐나다에서도 연료교환기를 작동 중에 진단하는 기술을 확보하지 못하고 있고, 단지 이동 가능한 부품만을 보수실로 옮긴 후에 보수실에서 작동상태를 점검하는 정도에 그치고 있다. 그러나 원자로 앞에 고정 설치되어 있는 브리지의 경우는 상황이 더욱 나빠서 원전의 운전이 정지된 후나 접근하여 상태 점검이 가능하다. 그러나 위와 같은 점검만으로는 가동 중 점차적으로 성능이 저하되어 발생하는 고장을 미리 예측하기란 불가능하다. 따라서, 핵연료 교환기의 고장으로 인한 중수로 원전의 정지를 미연에 방지하고, 원자력발전소 운영의 안전성과 효율성을 높여줄 수 있는 연료교환기 상태 진단 방법의 개발이 필요하다. 그런데, 핵연료 교환기가 작동중에 핵연료 교환기의 상태를 감시하기 위하여는 핵연

* 아주대학교 기계공학과
** (주)엠앤디
*** 한전 전력연구원
**** 한국수력원자력(주) 월성원자력본부

료 교환기를 변형시켜서는 안되기 때문에 신호의 측정은 반드시 비침투적으로 이루어져야 한다. 본 논문에서는 비침투적으로 측정이 가능한 신호인 브리지 구동 모터의 전압과 전류만을 원격에서 측정하여 브리지의 상태를 파악하기 위한 진단 신호를 구성하였다. 그리고 모형 브리지의 작동 실험을 통하여 진단 신호의 타당성을 검증하여 핵연료 교환기의 가동중 감시의 가능성을 보여주었다.

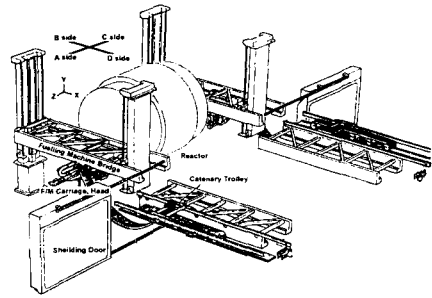


그림 1. 핵연료 교환기와 원자로 배치도

2. 핵연료교환기 브리지 모형 (1)

브리지는 핵연료 교환기 헤드와 캐리지를 지지하여 수직 방향으로 지정된 위치까지 이동시켜주는 역할을 하는 부분으로 고방사능 지역에 고정 설치되어 작동한다. 그림 1에 핵연료 교환기와 원자로의 배치도를 나타내었고 원자로 앞뒤에 브리지가 설치되어 있음을 알 수 있다.

즉, 브리지는 핵연료 교환기 헤드와 달리 보수실로 이동이 불가능하고 이에 항상 방사능에 노출이 되어있다. 따라서 실제의 브리지를 작동하면서 연구 목적으로 신호를 측정한다는 것은 원자력 발전소 운영상 불가능하다. 이에 본 연구에서는 실제 브리지의 작동 상태를 파악하기 위한 방법을 도출하기 위해 실제 브리지의 약 1/3 크기로 브리지의 특성을 재현해 낼 수 있는 브리지 모형을 설계, 제작하였다.

브리지는 크게 빔과 승강기, 칼럼으로 구성된다. 빔은 핵연료교환에 필요한 장비를 지지해주는 부분이고, 승강기는 빔을 양측에서 지지하면서 상승, 하강운동을 하는 부분이며, 이때 칼럼이 승강기의 상하운동을 지지해 준다. 브리지 모형의 동력전달 계통으로는 동력원인 모터, 모터 회전축과 마이터 기어 상자를 연결시켜주는 체인 커플링 그리고 동력 전달의 방향을 90°로 바꿔주는 마이터 기어 상자, 동력을 증폭하고 방향을 바꾸어주어 볼 스크류를 회전시키는 워프 워프 기어 쌍, 그리고 위치를 선도해주는 가이드로 구성되었다. 브리지 모형의 개략도는 그림 2와 같고, 그림 3에는 제작된 브리지 모형을 전면에서 촬영한 사진을 나타내었다.

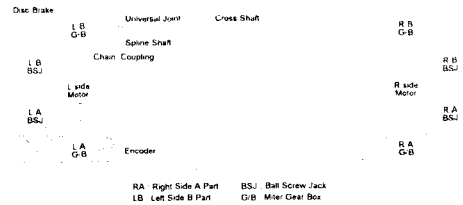


그림 2. 브리지 모형의 구동시스템 개략도

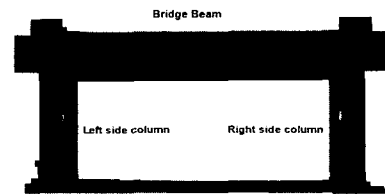


그림 3. 브리지 모형

3. 신호처리기법

브리지의 상태를 감시하기 위해서는 브리지 작동 시 각 부분에 작용하는 힘과 토크의 변화 그리고 브리지 각부의 움직임, 즉 각부의 속도와 위치를 파악하는 것이 필요하다. 이는 관심 있는 부분에 힘 센서와 토크 센서를 구조를 변경하여 삽입하거나, 거리센서와 엔코더를 장착함으로써 가능하다. 그러나 핵연료 교환기의 경우에는 신호 측정을 위하여 구조를 변경하는 것이 허용되지 않으므로 신호의 측정은 반드시 비침투적인 방법으로 이루어져야 한다. 그러므로 본 연구에서는 비침투적으로 측정이 가능한 모터의 입력 전압과 전류를 측정 신호로 선정하였고 이를 이용하여 진단 신호를

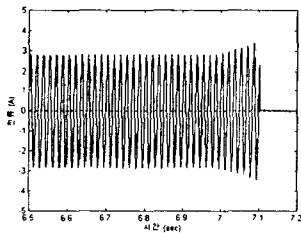
구하고자 하는데 이들 전압과 전류 신호는 모터 콘트롤 센터(MCC)에서와 같이 원자로실로부터 멀리 떨어진 곳에서 측정이 가능하여 작업자의 방사능 피폭에 대한 걱정이 없이 측정할 수 있다는 또 다른 장점이 있다. 측정된 전압과 전류 신호로부터 얻을 수 있는 진단 신호로는 전류의 실효값, 모터의 입력 전력 신호, 그리고 모터의 출력 토크 신호들이 있으며, 다음에서 이들 진단 신호들에 대한 비교를 하였다.

3.1 모터 입력 전류의 실효값

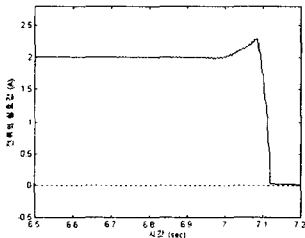
전압은 공급 전원의 상태에 따라 결정되지만 전류는 모터에 가해지는 부하에 따라 변하게 된다. 그러므로 많은 경우에 전류의 실효값을 이용하여 부하의 변화를 감시해왔다. 다음에 실효값을 구하는 식을 나타내었다.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1)$$

$x(t)$: 신호
 x_{rms} : 신호 $x(t)$ 의 T구간의 실효값
 T : 적분 주기



(a) 시간에 따른 전류 변화



(b) 시간에 따른 전류 실효값 변화

그림 4. 시간에 따른 전류와 전류 실효값의 변화

그림 4는 모터의 부하를 증가시키면서 측정된 전류와 시간에 따른 전류의 실효값을 보여준다. 그림 4에서 알 수 있듯이 부하가 증가하면 전류가 증가하고 이에 따른 전류의 실효값이 증가한다. 그러나 전류의 실효값은 일반적으로 부하와 비례한다고는 하지만 경우에 따라서는 부하가 증가할 때 전류의 실효값은 오히려 감소하는 경우도 발생한다.

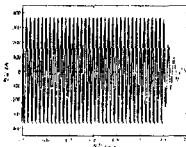
3.2 모터의 입력 전력

모터의 입력 전력은 입력 전압과 전류의 곱으로 표시된다. 본 연구에서 언급하는 모터의 전력은 순시 전력을 일컬으며 아래 식 2와 같다.

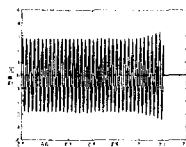
$$p(t) = v_1(t) \cdot i_1(t) + v_2(t) \cdot i_2(t) + v_3(t) \cdot i_3(t) \quad (2)$$

$p(t)$: 순시 전력
 $v_i(t)$: 3상 전원 단자의 전압
 $i_i(t)$: 3상 전원 단자의 전류

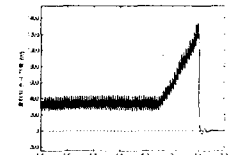
그림 5는 모터의 부하를 증가시키면서 측정된 모터의 전력이다. 전력 신호가 거의 일정한 주파수로 진폭이 변하는 것을 볼 수 있는데 이는 모터에 연결된 기어이의 맞물림 힘 변화로 기인된 것이다.



(a) 시간에 따른 전압 변화



(b) 시간에 따른 전류 변화



(c) 시간에 따른 순시 전력 변화

그림 5. 전압과 전류를 이용하여 계산한 순시 전력의 시간에 따른 변화

3.3 모터의 출력 토크 [2][3]

모터의 출력 토크는 모터의 부하와 비례하기 때문에 브리지의 상태를 감시하기에는 최적의 값이다. 모터의 출력 토크를 검출해내기 위한 수식은

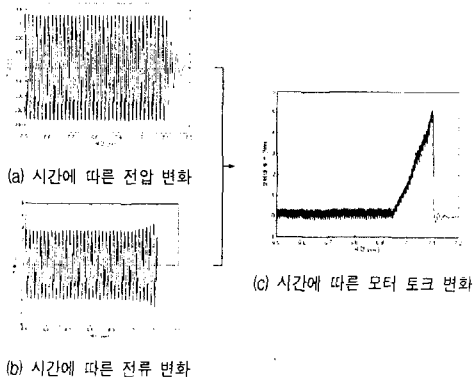


그림 6. 전압과 전류를 이용하여 계산한 모터 토크의 시간에 따른 변화
계산의 편의성을 고려하여 식(3)을 이용하여 3상의 신호 값을 2상의 신호 값으로 먼저 변환한다.

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

X_A, X_B, X_C : 3상 전압, 전류 또는 자속 링크수
 x_a, x_b : 2상 전압, 전류 또는 자속 링크수

일련의 대수 계산을 통하면 전기적인 토크는 다음 관계식과 같이 구해질 수 있다.

$$T = P(\lambda_{Sa} i_{Sb} - \lambda_{Sb} i_{Sa}) \quad (4)$$

여기서 P 는 모터의 극수, λ_{Sa} 와 λ_{Sb} 는 각각 a와 b상의 고정자 권선 자속 링크수, i_{Sa} 와 i_{Sb} 는 a와 b상의 전류이다. 그림 6에 위의 관계식으로 검출한 모터 토크를 나타내었다.

3.4 모터 입력 전류, 전력 그리고 토크의 비교

위의 언급된 세가지 진단 신호들을 비교함으로써 브리지 진단신호로 어떠한 신호가 가장 적절한 지를 살펴본다. 그림 7은 작은 부하가 충격적으로 모터에 걸렸을 경우의 상황을 비교한 그림이다. 모든 그림에서 충격적인 부하가 걸렸을 때 신호는 변화를 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 전류의 실효값은 그 변화량이 작아 부하 변동을 감지하기가 가

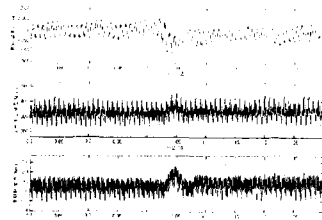
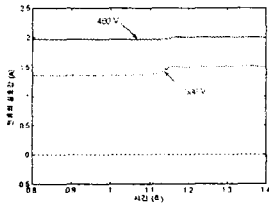
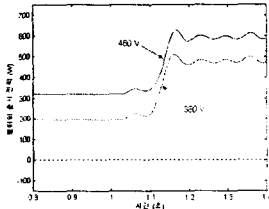


그림 7. 전류의 실효값, 모터의 순시전력과 모터 토크의 비교 (충격적인 작은 부하 존재 시)

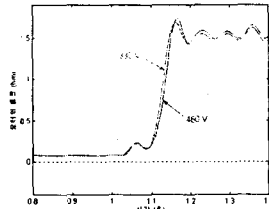
장 어렵고 충격적인 부하에 오히려 그 크기가 감소하여 전력 신호나 토크 신호와는 반대 현상을 보인다. 이는 전류의 실효값으로 부하의 크기 변화를 판단내리는 경우에 발생할 수 있는 오류를 보여주는 예라 하겠다. 그림 8은 공급 전원의 전압 변동 시에 전압 변동이 각 신호의 크기에 미치는 영향을 살펴 본 것이다. 세 가지 신호는 모두 같은 크기의 부하가 걸렸을 때 발생하는 신호로 전원의 전압이 460V인 경우와 380V인 경우를 동시에 표시하였다. 그림 8(a)에 표시된 전류의 실효값 신호는 전원의 전압과는 무관하게 구하여 지는 신호이다. 높은 전압에서는 전류가 더 많이 흐르기 때문에 460V의 전압 하에서 전류의 실효값이 큰 것을 볼 수 있다. 그러나, 부하의 변동 시 낮은 전압 하에서는 전류가 더 많이 증가해야 같은 출력의 변화를 초래하기 때문에 380V하에서 부하 변동에 대하여 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 모터의 부하 변동을 전류의 실효값을 이용하여 판단을 내리는 경우, 전압의 영향이 철저히 배제되기 때문에 같은 상황을 다른 상황으로 판단을 내리게 된다. 즉 두 그래프는 부하가 같지만 전원의 전압이 강하되어 전압이 380V일 경우에는 전반적인 부하가 작고 부하의 변동이 심하다는 오판을 내릴 것이다. 그림 8 (b)에는 전력 신호를 표시하였다. 전력은 전류와 전압의 곱이므로 전압의 영향이 반영되고 있어 전류의 실효값에서와 같이 전압 변화에 현격한 차이를 보이지 않지만 신호의 변화는 전류의 실효값과 비슷한 경향을 보이고 있다. 즉, 전압이 낮은 380V의 경우는 전압이 높은 460V인 경우보다 낮은 전력 값을 보이고 있다.



(a) 시간에 따른 전류 실효값의 변화



(b) 시간에 따른 모터 순시 전력의 변화



(c) 시간에 따른 모터 토크의 변화

그림 8. 입력 전압 차이에 따른 전류의 실효값, 모터의 순시 전력과 모터 토크의 비교

그러나, 부하의 변동 시에는 전류의 실효값은 크게 변화하는데 비하여 전력 값은 전압의 차이가 고려되어 전압이 높은 경우나 낮은 경우에 비슷한 변화량을 보여준다. 물론 전압이 낮은 경우가 미소하기는 하지만 민감하게 반응함을 볼 수 있다. 즉, 전력의 경우도 전압이 변동함에 따라 출력 값이 같은 경우도 다른 전력 값을 나타내기 때문에 상황을 오판할 가능성이 있고 자세한 진단을 하기에 부족함이 있다. 마지막으로 모터 토크의 값을 위에서와 같은 상황에서 살펴보았다. 그림 8 (c)에서 보여진 바와 같이 모터 토크의 값은 전압이 380V 이든 460V 이든 간에 항상 같은 출력 값을 결과로 주기 때문에 두 경우의 출력 토크 그래프는 일치하는 것을 볼 수 있다. 전류의 실효값 신호, 전력 신호 그리고 모터 토크 신호의 비교로부

터 모터 토크가 부하 변동의 감시 신호로 가장 적절하며 모터 토크 신호를 이용하여 진단을 수행할 경우에 상당히 정확한 진단을 수행 할 수 있다.

4. 실험

브리지 모형은 모터를 구동하여 브리지를 상하로 이동시키면서 데이터를 측정하였다. 전류계와 전압계를 브리지 모형 운전을 위해 제작된 콘트롤 패널에 설치하여 모터 방향으로 흐르는 전류와 전압을 측정하였다. 그리고 승강기의 정확한 위치를 측정하기 위하여 양측 칼럼 하단에 Wire LVDT를 고정하고, 와이어의 끝 부분은 승강기 하단에 고정하였다. 엔코더는 모터 및 각 회전구동부품의 회전수를 측정하기 위하여 마이터 기어 상자에 설치하였다. 모든 측정 신호는 동시에 측정 장치를 이용하여 취득하였다.

5. 해석 및 결과

5.1 진단 신호의 주파수 특성

브리지 하강 운전 시 검출된 모터 토크를 STFT (Short Time Fourier Transform)를 이용하여 시간에 따른 주파수 성분의 변화를 살펴보면 그림 9와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 토크 그래프는 모터의 회전 성분인 15Hz 근방에서 뚜렷한 피크가 존재함을 알 수 있고 이는 모터 토크 신호로부터 구동축의 회전수를 구할 수 있다는 가능성을 보여준다. 그림 10과 그림 11에는 각기 모터 전류의 실효값과 전력을 STFT한 결과를 나타내었는데 회전 주파수 성분인 15Hz 성분도 존재하지만 잡음 신호인 60Hz 성분과 30Hz 성분이 15Hz 성분보다 우세하다. 이는 모터 토크를 이용하는 것에 비하여 정확도 측면에서 나쁘다는 것을 보여준다.

5.2 윤회상태에 따른 토크 변화

그림 12에는 브리지를 상승 하강시키면서 토크의 변화를 위치의 함수로 나타내었다. 브리지의 연속적인 작동으로 인하여 볼 스크류 잭의 윤회 상태가 향상되어 모터에 걸리는 부하가 계속적으로 감

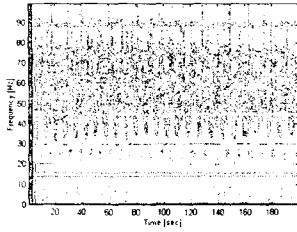


그림 9. 모터 토크를 STFT한 결과

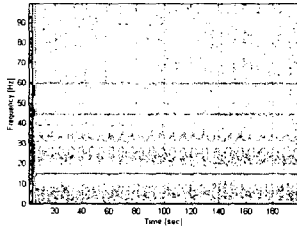


그림 10. 모터 전력을 STFT한 결과

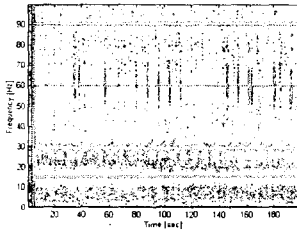


그림 11. 모터 전류를 STFT한 결과

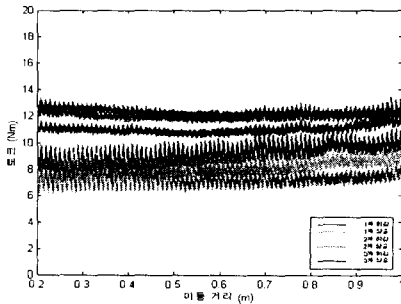


그림 12. 상하 반복시험에서 구한 모터 토크 (하중 : 2.1톤)

소하는 것을 보여준다. 즉 모터 부하는 볼 스크류 잭의 윤활 상태에 따라 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있고 모터 토크의 절대값 변화로 윤활 상태를 감시할 수 있음을 보여준다.

5.3 부하에 따른 토크 변화

그림 13은 브리지에 걸리는 하중의 변동에 따른 모터 토크의 변화를 보여준다. 하중 변동의 영향이 윤활 상태의 변화 영향보다도 작다는 것을 단적으로 보여준다. 하중이 증가하여 상승 시 토크와 하강 시 토크간의 간격은 커졌지만 상승 하강의 횟수에 따라 부하가 전반적으로 감소하는 현상은 앞의 예와 같고 그 변동의 폭이 하중 변동의 폭보다 크다. 횟수가 증가함에 따라 일정한 값으로 수렴함을 보여준다.

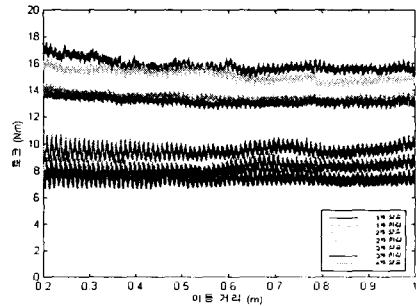


그림 13. 하중을 증가시킨 후 측정된 모터 토크 (하중 : 3.3톤)

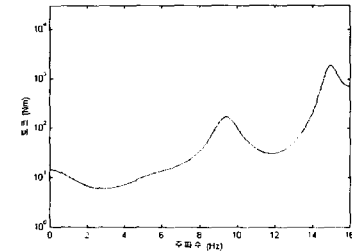


그림 14. 정렬이 양호한 상태의 모터 토크 신호를 15Hz 부근에서 AR Spectrum한 결과

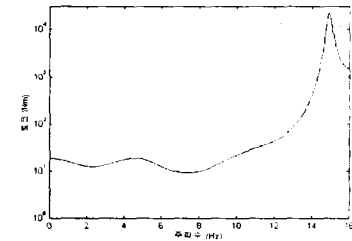


그림 15. 정렬이 불량한 모터 토크 신호를 15Hz 부근에서 AR Spectrum 한 결과

5.4 측정결 불량으로 인한 토크 변화

측의 정렬 불량은 회전 주파수에 그 영향이 가장 크게 나타나므로 AR(Autoregressive)모델^{[4][5]}을 이용하여 15Hz 부근의 주파수 성분을 살펴 그 크기를 비교하여 보았다. 그림 14와 그림 15를 비교하여 보면 15Hz 부근의 피크에 차이가 있음을 발견할 수 있다.

5.5 볼 스크류 잭의 웜과 웜 기어 정렬상태 진단

모터 토크 신호를 좀더 자세히 보면 회전 주파수인 15Hz 성분이 또 다른 주기로 움직인다는 것을 그림 16에서 알 수 있다.

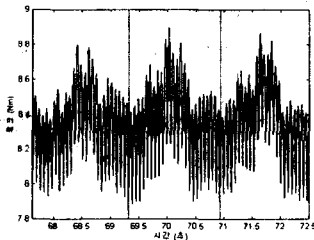


그림 16. 잡음을 제거한 모터 토크 신호

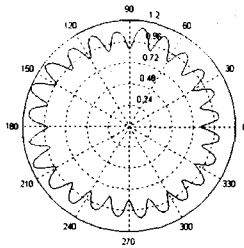


그림 17. 모터 토크값을 웜 기어 1회전에 대한 극좌표 그래프
이것은 바로 웜 기어가 1회전하면서 발생하는 신호로 웜 기어의 회전 정보와 그 형상을 예측할 수 있다. 웜의 형상이 완벽하다고 가정하면 웜 기어의 형상과 조립상태는 그림 17에 나타난 것과 같다. 즉 웜 기어가 중심에서 약간 이탈된 상태로 조립되거나 웜 기어가 완벽한 원이 되지 못하고 타원인 경우이다.

6. 결론

본 연구에서는 핵연료교환기 브리지에 대한 진단

을 원격에서 비침투적으로 수행할 수 있는 측정 신호의 선정과 측정 신호로부터 얻을 수 있는 진단 신호의 검출 그리고 진단 신호의 타당성을 실험을 통하여 검증하는 연구를 수행하였다. 측정 신호로는 모터의 입력 전압과 전류가 선정되었고 진단 신호로 모터의 출력 토크가 선정되었다. 그리고 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 핵연료교환기의 작동빈도에 따라 윤활상태는 향상되어 지고, 이에 따라 모터 토크가 작아지며, 일정한 값으로 수렴한다.
2. 하중 변동에 따른 모터 토크의 변화를 관찰할 수 있었으나, 모터 토크는 윤활의 영향에 따라 더 크게 좌우된다.
3. AR(Autoregressive) 모델을 이용하여 효과적으로 15Hz 부근의 주파수 성분의 크기를 계산하여 동력전달 축의 정렬상태를 감시할 수 있다.
4. 모터 토크로부터 기어의 회전 정보와 그 형상을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 브리지의 특성과 브리지 진단에 필요한 진단 신호의 해석 방법등이 연구되었다. 이는 핵연료 교환기를 총체적으로 진단하는 시스템을 개발하는데 필요한 중요한 한 단계이다.

후기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기계획사업으로 한전전력연구원 주관으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 협조에 감사드립니다.

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
- [4] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, "Discrete-Time Signal Processing", Prentice Hall, Inc., 1989
- [5] L.R. Rabiner, R.W. Schaffer, "Digital Processing of Speech Signals", Prentice Hall, Inc., 1978