

## 냉각재펌프 진동진단의 온-라인화에 관한 연구

이철권, 박희윤, 박진석, 구인수

한국원자력연구소

하재홍

한국전력기술(주)

### 요 약

위그너분포(Wigner Distribution)를 이용하여 진동신호를 분석하고, 신경회로망을 이용하여 온-라인으로 진동발생에 따른 냉각재펌프의 이상상태를 진단하고자 하였다. 진동신호 분석을 위하여 현재 정상 가동중인 원전 냉각재펌프의 진동신호와 Rotor Kit으로 부터 이상상태에 대한 모의신호를 추출하였다. 본 연구에서 진동신호 분석을 위하여 시간 및 주파수성분을 동시에 표현가능한 위그너분포 이론을 적용하므로써 기존의 시간 및 주파수성분을 별도로 표현하던 방법보다 신호분석이 용이함을 확인하였으며, 이 신호분석 결과를 바탕으로 역전파 신경회로망의 패턴인식 및 분류 특징을 이용한 진단결과는 실험데이터 량에 비추어 만족할 만한 인식률을 보였다.

### 1. 개요

냉각재펌프 진동감시의 목적은 냉각재펌프 본체와 회전축의 이상상태를 감시하기 위한 것으로, 냉각재펌프에서 발생하는 진동에 의한 펌프의 손상을 방지하고 또한 펌프손상으로 인한 발전소의 불시정지를 예방한다. 따라서 냉각재펌프 진동감시계통은 냉각재펌프 정렬상태와 회전체 균형을 조정할 수 있도록 냉각재펌프 축의 변위 및 진동크기를 설계수명기간 동안 온-라인 감시할 수 있어야 하며, 회전체 및 구조물의 공진점과 회전체 휨의 위치를 알 수 있어야 하며, 회전체 축균열 등의 결함을 검출할 수 있도록 설계되어야 한다.<sup>[1]</sup> 현재 원자력발전소에서 사용중인 냉각재펌프 진동진단계통은 진동분석 자료획득은 가능하나, 진동발생 원인의 복잡성과 분석방법의 어려움으로 인하여 현장 운전원에 의한 진단기능은 제대로 수행하지 못하고 진단전문가에 의해 오프-라인으로 원인규명이 이루어지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 최근 잡음 및 음향신호 분석 등에 사용되고 있는 시간-주파수 표현법(time-frequency representation)의 하나인 위그너분포를 사용하여 진동신호를 분석하고, 신경회로망을 이용하여 진동발생에 따른 냉각재펌프 이상상태를 온-라인으로 진단하고자 하였다.

## 2. 위그너분포에 의한 신호처리

위그너분포는 신호의 에너지분포를 시간-주파수 평면상에 나타내는 것으로, 다른 신호해석법들 (Instantaneous Frequency, Short-time Fourier 변환, Wavelet 변환)에 비해 주파수와 시간의 분해능이 뛰어나다.<sup>[2]</sup> 기존 회전체진동에 사용된 신호해석은 시간 및 주파수 각각에 대한 신호의 크기를 2차원으로 표시하므로써 시간과 주파수 변화에 따른 신호분석이 불가능하였으나, 위그너분포는 입력신호를 특정 시간 및 주파수에서의 세기(intensity)로 해석하여 신호의 에너지 밀도(density)를 시간과 주파수에 대해 동시에 3차원으로 표시한다. 따라서 위그너분포는 시간에 따라 변화하는 주파수성분이나 통계학적인 성질을 갖는 신호분석에 적용가능하며, 이를 회전체진동 분석에 적용하므로써 측정점에서의 각 진동원인에 대한 진동응답을 찾을 수 있고, 진동발생 주파수 및 공진점을 분석하여 각각의 진동원인들이 에너지분포에 기여하는 정도를 측정하므로써 분석이 용이하다. 그러나 위그너분포는 신호중첩에 따른 서로 다른 신호성분 간의 간섭신호를 발생시키는 단점이 있으며, 이를 해결하기 위하여 윈도우 함수를 사용하거나 해석신호(analytic signal)를 사용한다.<sup>[3]</sup>

신호함수  $x(t)$ 의 푸리에변환이  $X(f)$ 이고 복소 연속시간 해석함수일 때  $x(t)$ 의 시간영역에서의 위그너분포의 변환식 및 주파수영역에서의 변환식은 다음과 같이 정의된다.<sup>[4]</sup>

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad \text{----- (1)}$$

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f + \frac{\xi}{2}) X^*(f - \frac{\xi}{2}) e^{j2\pi t \xi} d\xi \quad \text{----- (2)}$$

여기서,  $x(t)$ 는 진동이력신호,  $f$ 는 주파수,  $x^*(t)$ 는  $x(t)$ 의 복소공액함수이며, 식 (1)을 실제 사용에서 온-라인 계산이 가능하도록 신호  $x(t)$ 를 시간  $t_a$ 에서 대역제한(band-limited)하면 다음과 같다.

$$x_w(t, t_a) = x(t) \cdot \omega(t - t_a) \quad \text{where, } \omega(t) = 0 \text{ for } |t| > T \frac{\omega}{2} \quad \text{----- (3)}$$

식 (3)의 Windowed 신호에 대한 위그너분포를 계산하면

$$W_{xw}(t, f) = \int_{-T_w}^{T_w} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) \cdot w(\frac{\tau}{2}) w^*(-\frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad \text{----- (4)}$$

로 된다. 본 연구에서는 Hanning 윈도우를 사용하였다. 식 (4)를 이산형의 근사식으로 표현하면 다음과 같다.

$$W_{xd}(m, n) = \Delta t \Delta \omega \sum_{k=m-M}^{m+M} \sum_{l=n-N}^{n+N} W_{xd}(k, l) W_D(m-k, n-l) \quad \text{----- (5)}$$

여기서  $k, l, m, n$ 은 정수,  $M, N$ 은 Sample Point 수,  $\Delta \omega = \pi / K \Delta t$ ,  $\Delta t$ 는 Sample interval( =  $1/f_s, f_s$ : Sampling frequency)이다.

## 3. 진동신호 취득 및 해석

신호분석을 위하여 현재 가동중인 영광 원자력발전소 3호기의 냉각재펌프의 정상상태 진동신호

와 미국 Bently Nevada 사의 Rotor Kit로 부터의 이상상태 모의신호를 근접센서를 이용하여 취득하였으며, 생성된 시간-주파수 특성들은 기존 발전소에서 사용되고 있는 진동분석 자료와 비교하여 본 연구의 분석결과와 타당성을 확인하였다.(그림 1) 현장신호는 정상 운전중인(1,200rpm) 영광 3호기의 4대의 냉각재펌프 별로 샘플링주파수 64Hz 및 128Hz에서 취득한 후 이를 분석하였다.(그림 2) Rotor Kit으로 부터는 추후 진동진단을 위한 기준입력이 될 정상운전상태 신호를 과도상태와 정상상태로 각각 취득하였다. Rotor Kit을 정지상태로 부터 6,000 rpm 까지 운전시켜 구한 과도상태 신호는 Rotor Kit이 갖고 있는 공진주파수를 찾아 이 시스템 고유의 특성을 알아보기 위한 것이며(그림 3), 정상상태는 정상조건에서 정상속도(1,200 rpm 및 2,400 rpm)로 회전중인 Rotor Kit의 축 진동을 측정, 분석한 것이다.(그림 4) 이상상태 모의신호는 회전체축 휨(회전체 축에서 각각 0.5mm, 1mm, 2mm의 휨), 회전체축 정렬불량(수직방향으로 1.4 mm의 편차 가함), 회전체 불평형(불평형질량을 2g 및 4g 추가), 베어링 마모(직경 10mm 인 Oilless 베어링을 직경 11mm로 확장), 회전체 지지체 고정불량, 회전체축 균열(원주방향 및 대각선방향으로의 균열)에 대하여 취득, 분석하였다.(그림 5-9) 또한 각 경우에 대한 베어링의 케이스진동을 가속도계로 측정하여(그림 10) 추후 수행되는 진동진단의 입력으로 사용하였다.

#### 4. 회전체진동 진단

위그너분포는 기존의 회전체 진동신호 해석방법에 비해 우수한 신호분석 스펙트럼을 제공하지만 전문지식이 없는 현장 운전원이 진동원인을 정확히 파악하기는 어려우며, 만일 파악된 원인추정에 오류가 발생한다면 이에 따른 경제적 손실을 초래할 수도 있다. 그러므로 진단의 자동화는 진단의 정확도를 제공할 뿐만아니라 운전원이 전문지식 없이도 쉽게 진단결과를 취득할 수 있는 수단을 제공한다. 본 연구에서는 회전체의 이상상태를 위그너분포에 의한 분석결과를 바탕으로 역전파신경회로망(Backpropagation Neural Network)을<sup>[5]</sup> 회전체진단에 적용하여 정확한 진단을 수행할 수 있는 전문가시스템을 구축하였다. 역전파신경회로망의 구성은 256개의 입력 노드, 두개의 은닉층(80개의 1차 은닉층 노드, 30개의 2차 은닉층 노드)와 7개의 출력노드로 이루어져 있으며, 학습데이터는 위그너분포의 정규화된(normalized) 스펙트럼을 사용하였다. 학습은 36개의 입력 - 정상상태(4), 회전체축 휨(8), 회전체축 정렬불량(4), 회전체 불평형(8), 베어링 마모(4), 회전체 지지체 고정불량(4), 회전체축 균열(4) - 을 사용하였고, 출력은 원하는 출력은 0.99로 그 외의 값은 0.01로 두고 학습시켰다 (즉, 정상상태학습시 출력은 (0.99, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01)). 학습전 초기의 연결가중치는 -0.5에서 +0.5 사이의 랜덤값으로 두었고 최소자승오차 설정값과 학습반복횟수 설정값은 각각 0.0005와 2500번으로 설정하였다. 또한 계산량을 줄이기위해 학습과정에서 학습율을 가변시켜 회로망의 성능은 충분히 발휘하면서 학습시간은 줄이도록 구성하였다. 학습과정에 사용된 학습율의 변화와 최소자승오차로 수렴하는 과정을 그림 11에 나타내었다. 정확도는 원하는 출력값과 실제 출력값과의 차이를 이용하여 산출하였다. Table 1에 학습된 회로망을 이용한 실험결과를 나타내었다.

## 5. 결과

기존의 진동진단에 사용된 스펙트럼에서는 시간변화에 따른 주파수성분의 변화를 볼 수 없다는 단점이 있으나, 본 연구를 통하여 개발된 위그너분포를 이용한 진동신호 분석은 두 정보를 동시에 제공하므로써 분석을 훨씬 용이하게 수행할 수 있었다. 즉, 시간-주파수분석도에서 Contour는 측정시간대에서의 주파수분포를 나타내며, 주파수 축상의 진동주파수 분포는 기존의 진동분석시스템이 보여주는 주파수 스펙트럼을 나타내며, 시간축 상에서는 시간변화에 따른 진동신호를 보여주고 있다. 또한 본 연구의 자동진단에서는 제외되었으나 가속도계에 의한 케이스진동 신호를 분석한 결과로 부터 펌프의 이상상태별로 진동의 크기와 발생주파수가 각기 달라짐을 알 수 있었으며, 이는 추후 진동진단에 또 다른 입력정보로 사용가능함을 알 수 있었다. 그리고 역전파 회로망이 갖는 패턴인식 및 분류의 특징을 이용하여 위그너분포의 스펙트럼으로부터 펌프상태를 진단하는 전문가시스템을 구축하였으며, 실험결과 인식률은 약 81.2%의 정확도를 보였으며 이는 충분한 실험데이터가 제공되면 훨씬 높아질 것이다.

## 6. 결론

위그너분포 이론을 적용한 냉각재펌프진동 분석은 기존의 진동 분석시스템에 비해 비록 위상정보를 표현할 수 없었지만 진동분석을 훨씬 용이하게 할 수 있었다. 또한 개발된 진동분석 정보를 바탕으로 진단을 온-라인화하기 위하여 개발된 진단시스템은 전문가가 아니면 진동원인 해석이 어려웠던 것을 현장운전원이 직접 이상상태의 원인을 파악할 수 있도록 하였다. 연구결과는 냉각재펌프에 이상발생시 운전원이 신속하게 대응하므로써 기기손상을 사전에 방지하여 펌프의 가동률 및 안전성을 향상시킬 것이며, 나아가 일반 회전체진동 감시 및 진단에도 적용가능할 것이다.

### [참고문헌]

1. "Vibration Monitoring of Rotating Equipment in NPP", Part 14 of ASME OM-S/G, 1994
2. T.J. Wahl and J.S. Bolton, "The Application of the Wigner Distribution to the identification of Structure-Borne Noise Components", Journal of Sound and Vibration 163(1), pp. 101-122, 1993
3. B. Boashash, "Note on the Use of the Wigner Distribution for Time-Frequency Signal Analysis", IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 36, No.9, Sep. 1988
4. L. Cohen, "On a Fundamental Property of the Wigner Distribution", IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-35, No.4, Apr. 1987
5. Simon Haykin, "Neural Networks - A comprehensive foundation", Macmillan College Pub., 1995

표 1. 신경회로망을 이용한 회전체진단의 정확도

회전체의 상태	시도횟수	인식횟수	정확도(%)
정상상태	24	20	83.3
회전체축 휨	28	22	78.6
회전체축 정렬불량	26	21	80.8
회전체축 균열	29	24	82.8
회전축지지체 고정불량	20	16	80.0
베어링 마모	20	16	80.0
회전체 불균형	22	18	81.8

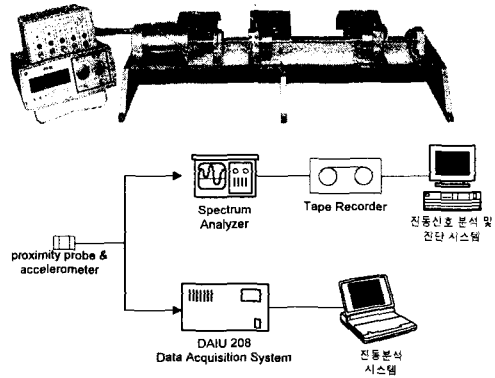


그림 1 실험장치 구성도

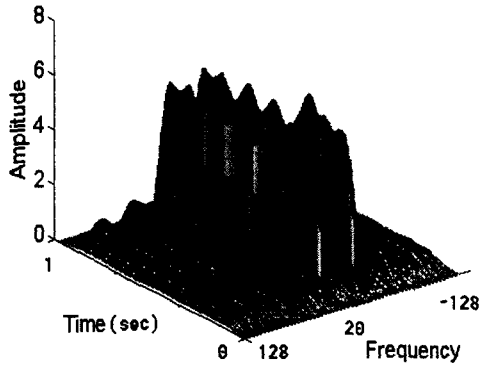
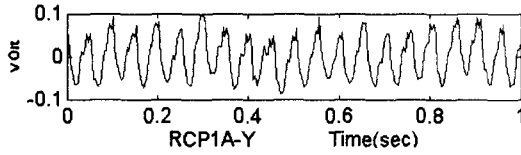


그림 2 냉각재펌프 1A(Ch. Y)의 진동신호 및 WD

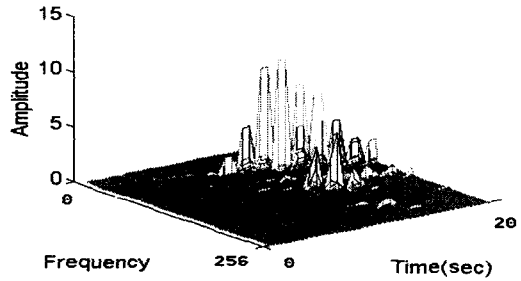


그림 3 Rotor Kit의 과도상태의 WD

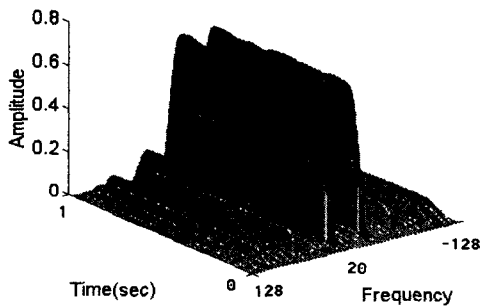


그림 4 정상상태(1,200rpm)에서의 WD

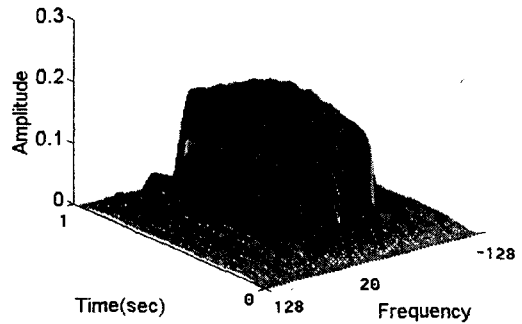


그림 5 축 휨(1mm)에서의 축 진동

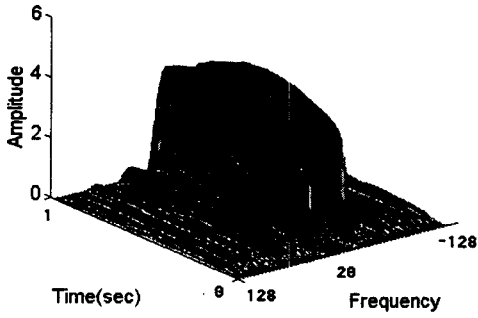


그림 6 축 정렬불량에서의 축 진동

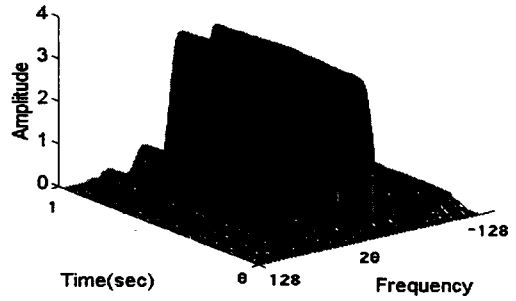


그림 7 회전체 불평형(2g)에서의 축 진동

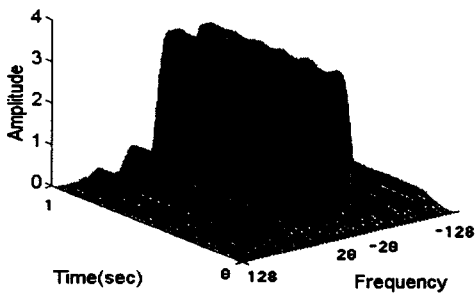


그림 8 베어링마모에서의 축 진동

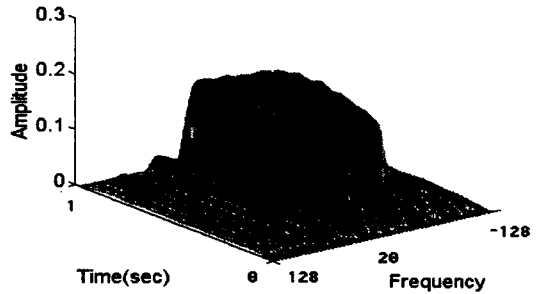


그림 9 회전축균열(축의 대각선방향)에서의 축 진동

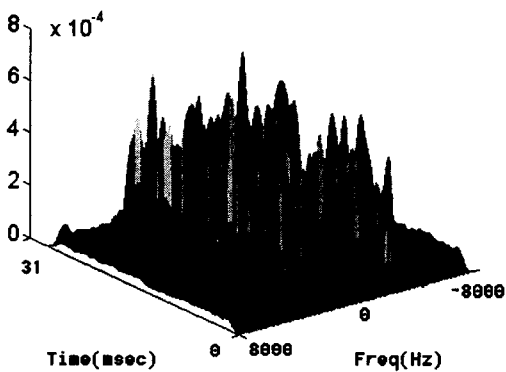


그림 10 정상상태(1,200rpm)에서 케이스 진동

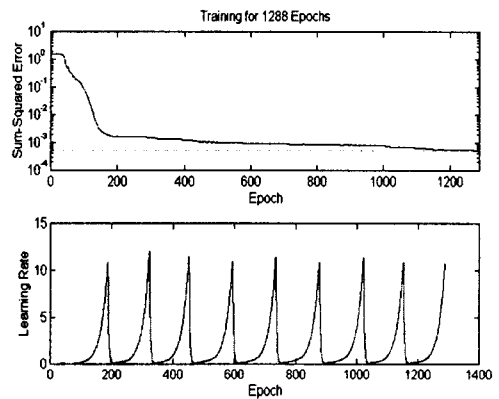


그림 11 반복횟수 대비 최소자승오차 및 학습율