

공학석사 학위논문

신호분석기법을 이용한 대형
복수펌프 구동용 전동기
이상진동 분석 및 진단

2006년 2월

부경대학교 산업대학원

기계설계학과

채 순 석

공학석사 학위논문

신호분석기법을 이용한 대형
복수펌프 구동용 전동기
이상진동 분석 및 진단

지도교수 김동조

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2006년 2월

부경대학교 산업대학원

기계설계학과

채 순 석

채순석의 공학석사 학위논문으로
인준함

2005년 12월

주 심 공학박사 양 보 석 (인)

위 원 공학박사 이 우 방 (인)

위 원 공학박사 김 동 조 (인)

목 차

ABSTRACT	2
1. 서 론	3
2. 이론적 배경	5
2.1 진단분석용 진동신호의 특징 추출	5
2.2 웨이블릿변환 이론	9
3. 원자력발전소 계통 및 대상 설비	15
3.1 일반 계통 개요	15
3.2 복수 계통	17
3.2.1 개요	17
3.2.2 설비 현황	17
3.2.3 복수펌프 및 전동기	18
3.3 대형 전동기의 점검정비 이력	20
4. 전동기 결합	22
4.1 결합 개요	22
4.2 기계적인 결합	24
4.3 전기적인 결합	28
5. 신호 측정 및 분석	36
5.1 신호 측정	36
5.2 신호 분석	37
6. 결 론	52
참고문헌	53

Abnormal Vibration Analysis and Diagnosis of Induction Motor for Large Condensate Pump Using Signature Analysis Techniques

Sun-Seok Chae

*Department of Mechanical Design,
Industrial Graduate School,
Pukyong National University*

ABSTRACT

Recently electric power plants are becoming a very large and complex with increasing electric power demands. In particular it is required to perform the specific maintenance thoroughly because the facilities are very large and complex in the nuclear power plant. Also we are have to make an effort to find the abnormal cause early using advanced predictive diagnosis method. It will be very helpful to extend equipment reliability and availability. Large induction motors are important components in the power plant and experienced many troubles in operation. Therefore it will be necessary to early detect the abnormal condition. Therefore, this paper propose a diagnosis method for abnormal vibration in induction motors by using wavelet transform which is known to be a powerful method to analyse non-stationary signal. As a result, application of the wavelet transform method are very useful tool to diagnose abnormal vibration in rotating machinery such as a large induction motor for condensate pump installed at the nuclear power plant.

1. 서 론

최근의 발전설비는 전력수요의 증가와 더불어 대형화됨에 따라 구성기기 또한 매우 복잡하고 대용량화 되었다. 특히 원자력발전소의 경우, 각종 설비가 대형일 뿐 만 아니라 수많은 설비가 복합적으로 구성되어 매우 복잡하기 때문에 이에 대한 점검정비를 철저히 하여야함은 물론이고 과학적인 예측진단을 통해 설비의 이상 유무를 조기에 파악하여 설비의 신뢰성을 높이는 노력이 필요하다.

발전설비의 주요 구성품 중에서 전동기는 빼놓을 수 없는 주요 설비이다. 전동기는 각종 펌프, 웅, 밸브 등을 구동시켜 발전소 계통을 운전하기 때문에 전동기의 신뢰성은 발전설비의 안정적 운전에 직결된다. 그러나 근래에 들어와 전동기의 잦은 고장으로 발전소의 안정운전이 크게 위협받고 있다. 전동기의 고장원인은 전기적인 원인과 기계적인 원인이 있으며 이에 대한 고장진단 및 정비도 기계적 요소와 전기적 요소를 종합적으로 판단하여 수행하여야 한다. 전동기의 기계적 결함으로는 베어링(bearing) 요소의 불량, 축(shaft)계 결함, 커플링(coupling) 불량, 설치(mounting) 불량 등이 있으며, 전기적 결함으로는 공극(air gap) 불량, 회전자(rotor) 및 고정자(stator) 불량 등이 있다. 그리고 이러한 결함들은 전동기 자체가 회전체이기 때문에 그 증상이 진동과 소음으로 나타난다. 따라서 이를 조기에 발견하여 정확하게 진단함으로써 예측정비를 가능하게 하고 이로 인해 설비의 신뢰성을 높이는 수단이 필요하다.

지금까지 대형 전동기의 이상 진단에는 일반적으로 절연저항, 입력전류, 진동 측정 등을 통하여 데이터를 취득하고 이를 분석하여 전동기의 이상상태를 점검하여 왔다. 그러나 결함초기에 발생하는 이상신호들은 대부분 국부적이거나 신호의 크기가 아주 작게 나타나는 비정상신호(non-stationary signal)이므로 기존의 정상신호 처리방법으로는 많은 제한이 있고, 결함이 어느 정도까지 악화되기 전에는 기기결함을 조기에 발견하는 데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 대형 전동기의 이상 진단에 기존의 진동진단 및 입력전류 분석기법 외에 운전기기에 직접 접촉하지 않으면서도 측정할 수 있는 소음(noise)과 시간-주파수영역 해석법 중 비정상신호의 분석에 뛰어난 웨이블렛변환(wavelet transform)기법을 이용하여 회전기계의 이상상태를 조기에 진단 및 분석하는

방법을 찾고자 하였으며, 대상 설비로서는 원자력발전소 2차측 주요 설비인 대형 복수펌프 구동용 전동기의 이상상태 진단 및 신호분석에 적용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 진단분석용 진동신호의 특징추출^(1,2,16,18)

회전기계의 진동신호는 보통 시계열의 신호로 측정된다. 그러나 시계열의 신호는 기계의 각종 상태에 대한 많은 특징 정보를 포함하고 있지만, 필요한 특징량이 기계의 각종 상태에 대한 많은 특징정보를 포함하고 있다. 그러므로 기계의 각 상태를 효과적으로 평가하기 위해서는 시계열 신호에 대하여 적절한 신호처리 기법을 도입하여 각 상태를 잘 표현할 수 있는 특징을 추출하고 공통적으로 갖고 있는 특징을 제거하는 것이 필요하다.

2.1.1 특징추출의 원칙

회전기계의 진동은 신호가 나타내는 형상을 보았을 때 다양하고 복잡하지만 앞에서 언급한 바와 같이 기계의 각 상태는 그 상태에 대응하는 일정한 진동특징을 가지고 있다. 그러므로 진동을 측정하고 분석함으로써 기계의 상태 파악과 각종 고장원인을 진단할 수 있다. 진동의 측정은 보통 시간에 따른 진폭의 변화를 측정하게 되고 시간신호는 진동의 모든 정보를 갖고 있으며 측정이 편리한 것이 특징이다. 그러나 회전기계에서 발생하는 진동은 여러 부위에서 발생하는 각각의 진동주파수와 진폭을 갖는 많은 진동들이 합성하여 나타나므로 각 성분의 상호 위상각이 시시각각 변화한다. 따라서 시간신호에서 진동의 고유적인 특징을 알 수 없다. 그래서 일정한 신호처리 기법을 도입하여 기계의 각 상태가 갖고 있는 고유적인 특징을 추출하는 것이 필요하다. 이러한 과정을 특징추출(feature extraction)이라 하며 기본원칙은 다음과 같다.

- (1) 특징량을 정확하게 선택하여야 한다.
- (2) 특징량은 시각에 따라 변하지 않고 일정하고 안정된 값이어야 한다.
- (3) 동일한 상태의 특징량은 서로 거리가 작아야 하고 서로 다른 상태의 특징량의 상호거리는 커야한다.
- (4) 특징량의 수는 각 상태를 충분히 표현할 수 있는 조건하에서 될 수 있도록 적어야 한다.

2.1.2 특징추출기법

기계의 상태감시와 고장진단에서 계측기로 측정된 신호는 연속적이고 A/D 변환기를 이용하여 변환하여야만 컴퓨터가 처리할 수 있는 이산신호 즉, 시계열 신호로 된다. 시계열 신호는 시간상 연속적으로 측정된 것이 아니고 통계적인 표본 값이다. 그러므로 시계열신호 자체는 직관적으로 시스템의 상태변화를 표현할 수 없고, 신호에 대하여 통계적인 처리기법을 이용하여 처리 분석하고 일정한 통계적 규칙을 갖고 있는 통계량을 구축하여 이 통계량으로 시계열 신호의 특징을 표현하여야 한다.

2.1.3 Fourier변환

회전기계의 진단에 있어서 주파수 스펙트럼 분석은 현재 가장 널리 사용되고 있는 기법이며, 또한 가장 효과적인 방법이다. 주파수 스펙트럼 분석은 푸리에변환(Fourier transform)으로 구하여 진다.

함수 $x(t)$ 는 주기 T 를 갖고 있고 실수 영역에서 적분이 가능하다면, 아래와 같이 Fourier 급수로 전개할 수 있다.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (2.1)$$

여기서 $\omega_0 = 2\pi/T$ 이고 a_0 는 $x(t)$ 의 산술평균이며, 계수 a_n ($n = 0, 1, 2, \dots$)과 b_n ($n = 0, 1, 2, \dots$)은 다음 식으로부터 계산된다.

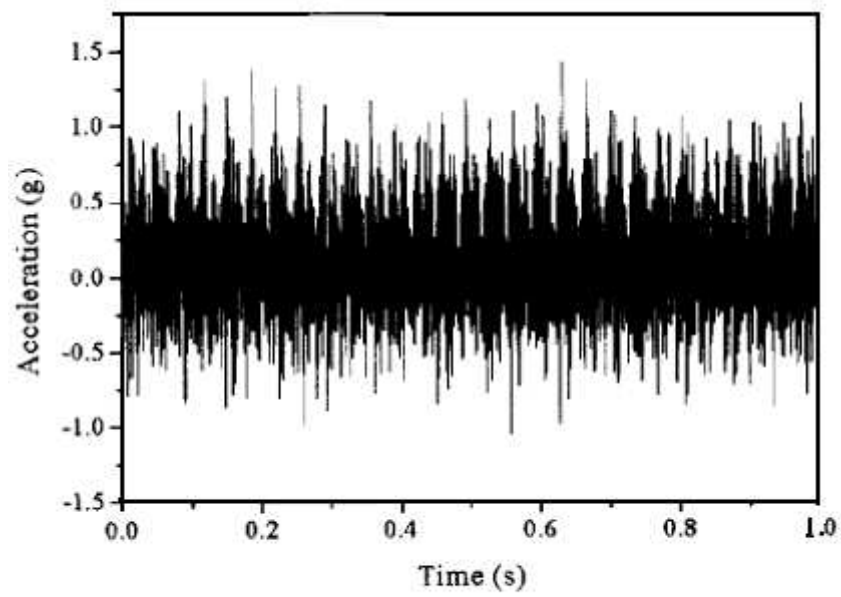
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (2.2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (2.3)$$

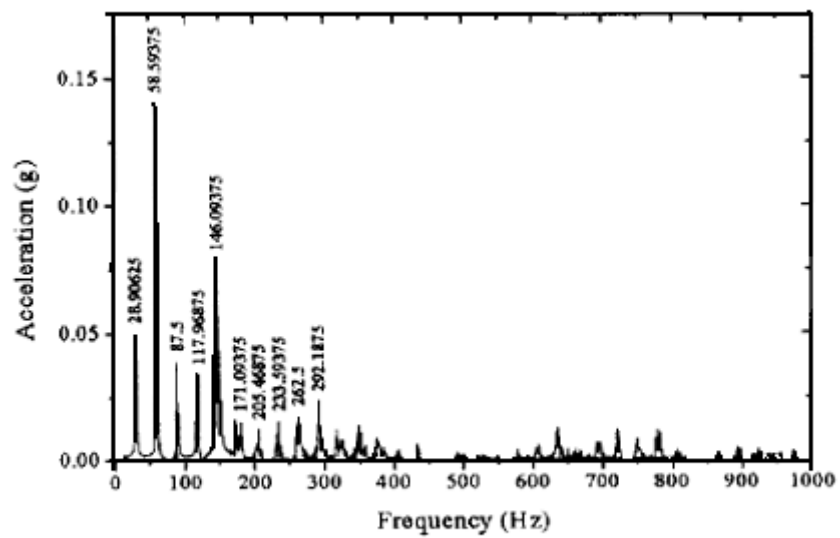
일반적으로 컴퓨터에서 처리하는 신호는 일정한 시간간격으로 샘플링(sampling)한 이산치(discrete value)이기 때문에 이산 Fourier변환을 수행하여야 한다. 이산 Fourier 변환식은 다음과 같다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.4)$$

회전기계의 진동신호는 여러 부품의 진동이 합성하여 나타나고 각 부품들의 진동은 가진력 주파수와 고유진동수에 의하여 일정한 진동주파수를 갖고 있다. **Fourier**변환을 통하여 합성되어 나타나는 신호에서 각 부품의 진동성분을 분리할 수 있고 각 부품의 진동특성으로부터 부품의 고장을 진단할 수 있다. 그림 2.1에 고장실험장치에서 측정한 편각 정렬불량 진동신호의 시간파형과 시간신호에 대하여 **Fourier**변환을 수행하여 구한 주파수스펙트럼을 나타내었다. 시간파형으로부터는 편심 정렬불량을 판단하기 어렵지만 주파수 스펙트럼에서는 회전주파수의 2배 성분인 58.6Hz 성분이 매우 크게 나타나고, 그리고 1x, 3x, 4x, 5x 성분이 비교적 크게 나타나고 있으므로 편각 정렬불량을 판단할 수 있다.



(a) Time signal



(b) Frequency spectrum

그림 2.1 정렬불량 상태의 진동신호

2.1.4 웨이블렛변환

Fourier변환은 시간영역의 신호를 주파수영역으로 변환하여 신호의 각 주파수 성분은 관찰할 수 있으므로 이로부터 진동의 원인을 파악할 수 있다. 그러나 Fourier 변환은 연속적인 조화성분으로 진동하는 신호에는 분석이 가능하지만 불연속적인 과도신호는 정확한 분석을 기대할 수 없다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 창 함수(window function)를 이용하여 창을 이동하고 각 시각의 신호에 대하여 Fourier 변환을 수행하여 시각에 따른 각 주파수 성분의 변화를 관찰 할 수 있도록 한 short time Fourier 변환이 제안되어 있다. short time Fourier 변환은 일정한 범위에서 시간에 따른 각 주파수성분의 변화를 관찰할 수 있지만 이동하는 창의 크기가 고정되어 있기 때문에 주파수 영역이 좁아서 실제 응용에서 많은 제한을 받게 된다. Wavelet 변환은 기초함수를 도입하여 기초함수의 넓이를 조절함으로서 고주파수 대역과 저주파수 대역의 해상도(resolution)를 높이고, 또 기초함수의 시간 축에 따라 이동함으로서 각 주파수 성분이 시간에 따른 변화를 표현할 수 있다.

2.2 웨이블렛변환 이론^(1,2)

웨이블렛 변환은 분석대상이 되는 신호를 시간-스케일 단위의 선형조합으로 분해하는 것이다. 웨이블렛이란 평균값이 0인 제한된 기간의 파형을 말하며 웨이블렛 분석은 원신호를 mother wavelet(또는 wavelet basic function이라 함)의 천이(translation)와 스케일(scale)값의 변화에 따라 여러 가지 신호성분으로 분해하는 것으로 시간에 따라 각각의 주파수성분의 변화추이를 알 수 있다. 그림 2.2는 웨이블렛 변환의 개략도이다. 그림에서와 같이 동일 스케일의 mother wavelet을 팽창시킨 다음 앞의 과정을 반복하는 것으로 변환이 수행된다. 웨이블렛은 신호나 시스템을 근사화하는 데 이용되며 웨이블렛의 각 요소들은 mother wavelet이라고 불리는 하나의 기본함수에 의해 형성된다. 웨이블렛의 각 요소들은 스케일되고 이동된 mother wavelet이다. 하지만 이 웨이블렛 집합은 mother wavelet과 같은 수로 진동하고 mother wavelet이 가지고 있는 에너지와 동일한 에너지를 가지고 있다. Fourier해석은 신호를 다양한 주파수의 sine파로 분해하는 것으로 구성된다. 이와 유사하게 웨이블렛 해석은 신호를 이동하고 스케일한 mother wavelet의 형태로 분해한다. 그러나 Fourier 변환은 기본함수로서 단지 지수함수만을 선택할 수 있지만 웨이블렛 변환에서는 허용조건을 만족하는 함수에 한해 mother wavelet으로 어떠한 함수도 이용하는 것이 가능하다.

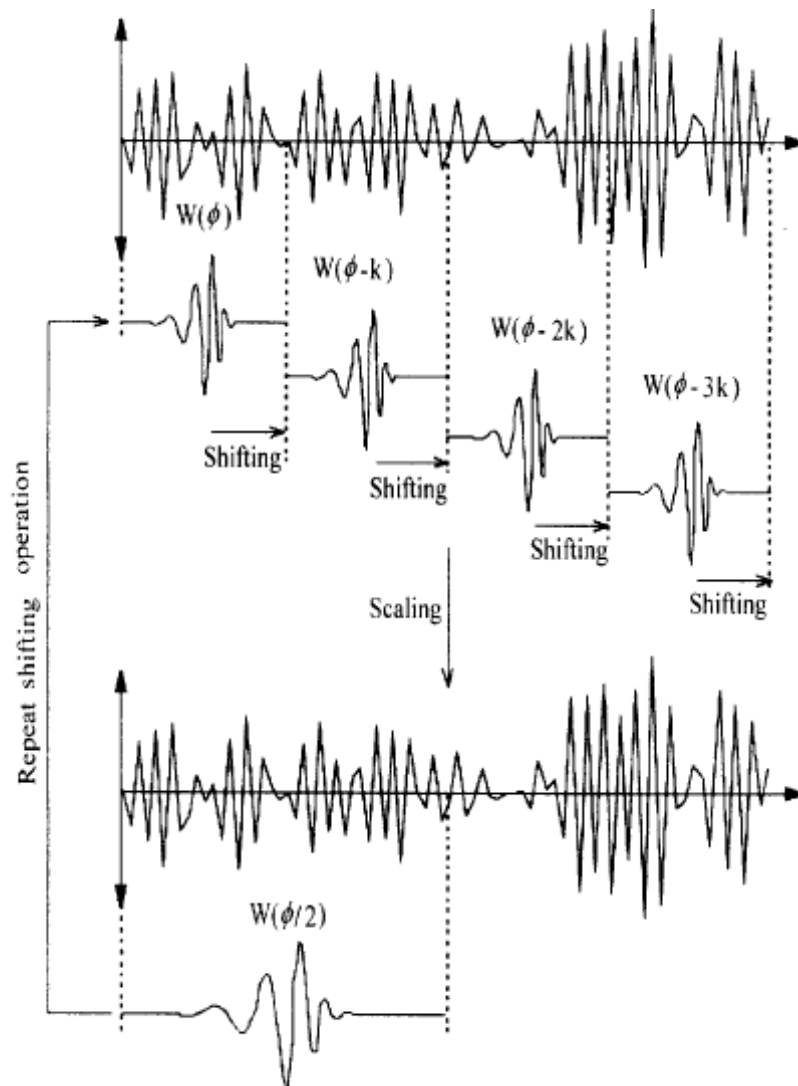


그림 2.2 웨이블릿 변환의 개략도

2.2.1 연속 웨이블릿 변환(Continuous Wavelet Transform, CWT)

연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform)은 분석대상 신호 $f(t)$ 와 천이되고 스케일된 mother wavelet $\Psi_{a,b}$ 의 곱을 전 시간구간에 대해 적분한 것이다. 시간함수 $f(t)$ 의 연속 웨이블릿 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$CWT(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi_{a,b} dt \quad (2.5)$$

$$\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.6)$$

여기서 a 는 스케일 파라미터, b 는 천이파라미터, Ψ 는 mother wavelet을 나타낸다. 웨이블렛 변환 결과는 특정한 천이에서의 신호 $f(t)$ 스케일 되고 천이된 mother wavelet과의 비슷하면 변환 결과는 큰 값을 가질 것이다. 웨이블렛 변환에 있어 중요한 개념인 천이는 앞섬과 지연을, 스케일은 확장과 압축을 의미한다. 고주파 신호 성분에 대해서는 시간영역에서의 감도를 높이고 저주파 신호 성분에 대해서는 주파수 영역의 감도를 높인다. 이로 인하여 다중 해상도 분석(multi resolution analysis)이 가능하다.

만약 $f(t)$ 와 Ψ 가 유한에너지 함수이고, Ψ 가 실수 a, b 에 대해 식 (2.3)을 만족하는 허용 가능한 mother wavelet이면, 역 웨이블렛 변환(inverse wavelet transform)은 스케일-이동 평면에서 일차원인 시간이나 공간으로 이동한다. 연속 역 웨이블렛 변환을 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{1}{C\Psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CWT(a,b) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dbda}{a^2} \quad (2.7)$$

역변환은 mother wavelet에 가중치를 부여하여 더하는 것으로 행해진다. 만약 웨이블렛 변환에 사용하였던 mother wavelet과 역변환에 사용한 mother wavelet이 다른 경우에는 원신호 $f(t)$ 를 복원할 수 없다.

2.2.2 이산 웨이블렛변환(Discrete Wavelet Transform, DWT)

연속 웨이블렛 변환에서는 모든 스케일에서 웨이블렛 계수를 계산하므로 많은 시간을 요하고 많은 데이터를 생성한다. 이러한 결점을 보완하기 위해서 이산 웨이블렛 변환(discrete wavelet transform)은 2의 누승이 되는 스케일에서 웨이블렛 변환을 수행함으로써 정확성을 유지한 상태에서도 계산시간을 훨씬 줄이기 때문에 보다 효율적인 변환을 수행할 수 있다. 이산 웨이블렛변환에 있어 스케일함수 $\phi(t)$ 와 웨이블렛함수 $\Psi(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi(t) = \sum_k c_k \phi(2t - k) \quad (2.8)$$

$$\Psi(t) = \sum_k (-1)^k c_k \phi(2t + k - N + 1) \quad (2.9)$$

여기서 N 은 2의 누승인 데이터의 개수, C_k 는 웨이블렛 계수이며 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$\sum_{k=0}^{N-1} c_k = 2, \sum_{k=0}^{N-1} c_{k+2b} = 2\delta \quad (2.10)$$

여기서, δ 는 Kronecker 델타를 의미한다.

식(2.8), (2.9), 및 (2.10)을 이용한 이산 웨이블렛변환식은 다음과 같다.

$$DWT[m, k] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum x[n] g\left[\frac{k - na_0^m}{a_0^m}\right] \quad (2.11)$$

여기서, $g[n]$ 은 mother wavelet, 식 (2.5)에 나타낸 연속 웨이블렛변환의 이동과 스케일 파라미터 a, b 는 정수 m 의 함수인 $a = a_0^m$ 과 $b = na_0^m$ 으로 표현된다.

그림 2.3은 DWT 회로들 중 하나를 구체화한 것으로써 입력신호는 이산 웨이블렛변환 회로를 거치면서 고대역 통과필터(high pass filter)를 거친 신호는 웨이블렛계수로 나타나고, 저대역 통과필터(low pass filter)를 통과한 신호들은 다음 단계의 DWT회로로 이동하게 된다. 이 과정에서 필터들을 통과한 신호들은 down sampling됨으로써 연산속도가 향상된다. 이와 같은 과정을 반복함으로써 이산 웨이블렛변환이 수행된다. 그림 2.4는 역 이산 웨이블렛변환 (Inverse Discrete Wavelet Transform, IDWT)회로들중 하나를 구체화한 것이다. IDWT에서는 이산 웨이블렛변환과는 반대의 과정을 수행한다. 즉, up sampling이 먼저 이루어지고 고대역 통과필터와 저대역 통과필터를 거쳤던 신호들이 합성됨으로써 원신호를 복원할 수 있다.

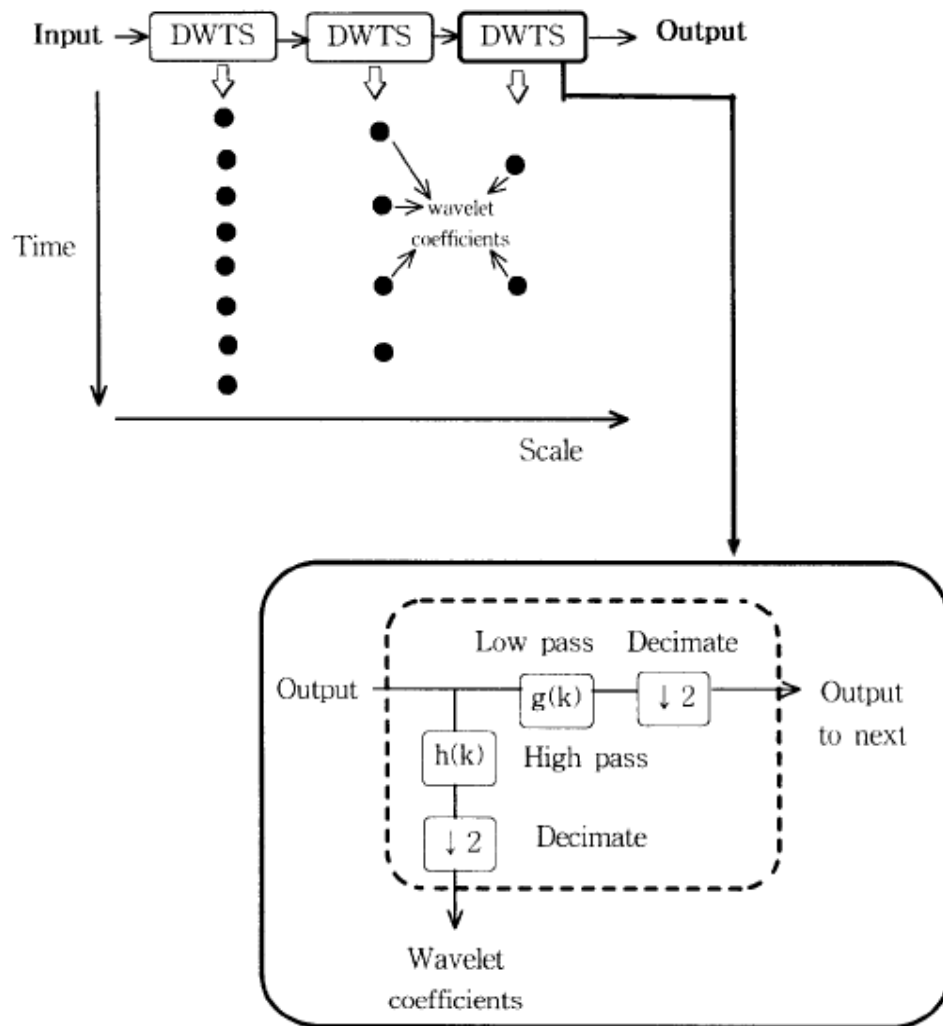


그림 2.3 이산 웨이블릿 변환의 개략도

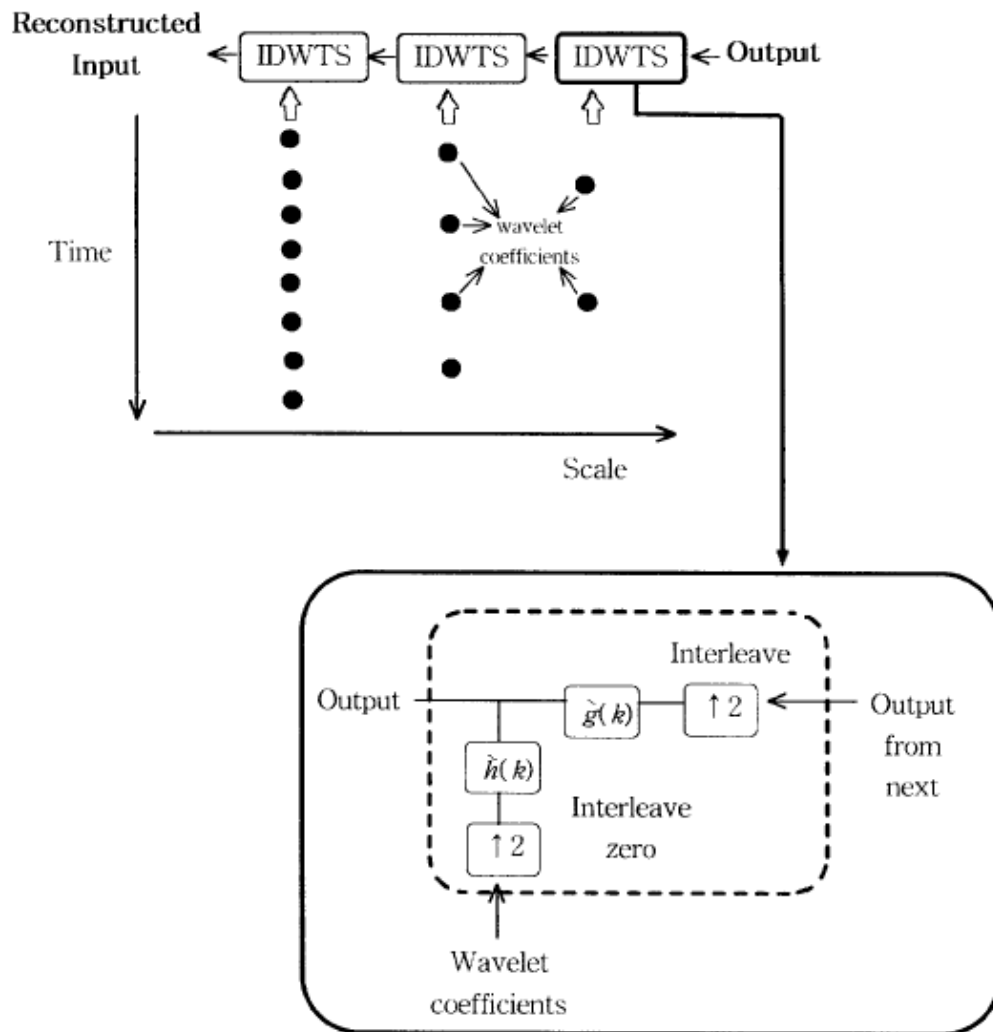


그림 2.4 역 이산 웨이블렛 변환의 개략도

3. 원자력발전소 계통 및 대상 설비

3.1 일반 계통 개요

원자력발전소는 크게 1차 계통과 2차 계통으로 구분되어 진다. 1차 계통은 원자로를 중심으로 한 핵증기공급계통(nuclear steam supply system : NSSS), 안전관련계통(safety related system), 방사성폐기물처리계통(radioactivity disposal process system), 보조계통(auxiliary system)으로 구성되어 있다.

원자로에서 발생된 핵 붕괴열은 원자로냉각재계통(reactor coolant system : RCS)의 가압된 경수(light water)로 냉각되고, 냉각 과정에서 흡수된 열은 증기발생기(steam generator) 전열관을 통하여 2차측 급수를 가열하여 증기를 생산하여 터빈-발전기가 있는 2차측에 공급된다. 2차 계통은 1차측에서 공급한 증기를 흡수하여 기계적에너지로 전환시키는 터빈(turbine)과 터빈 축(turbine shaft)에 연결되어 전기를 생산하는 발전기(generator)가 있다. 주요 계통으로는 증기발생기(steam generator)에 급수(feedwater)를 공급하여 증기를 생산토록 하는 주급수계통(main feedwater system)과 증기발생기에서 생산된 증기를 2차측 터빈에 전달하는 주증기계통(main steam system), 터빈추기(turbine extraction steam)를 복수기(condenser)에서 응축하여 다시 급수계통에 전달하는 복수계통(condensate system) 그 밖에 화학약품계통(chemical system) 및 보조계통(auxiliary system)으로 구성되어 있다. 그림 3.1은 대표적인 증기원동기 재열재생사이클이며, 그림 3.2는 원자력발전소 2차 계통을 개략적으로 표시한 도면이다.

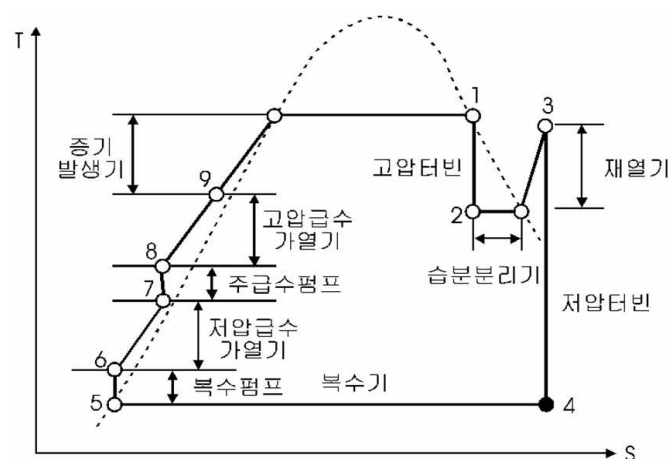


그림 3.1 증기원동기 재열재생사이클

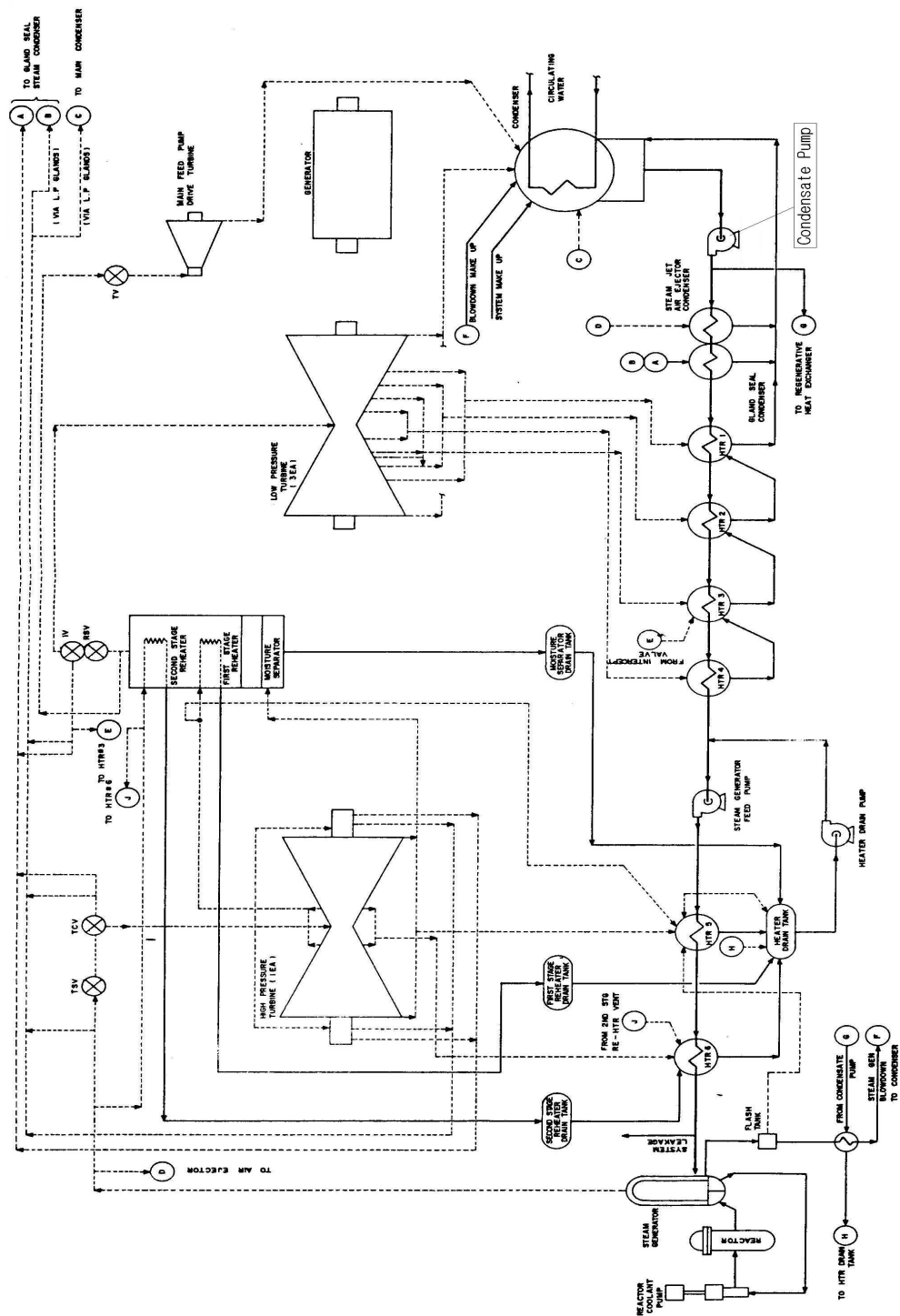


그림 3.2 원자력발전소 2차 계통 개략도

3.2 복수 계통(Condensate System)

3.2.1 개요

복수 계통은 3대의 복수기에서 회수된 용수를 4대의 복수펌프(condensate pump)로 3계열 4단계(3 train, 4 stage)의 저압급수가열기를 경유하여 급수계통에 용수를 공급하는 역할을 한다. 복수 계통의 주요 설비로는 터빈추기(turbine extraction steam)를 응축하는 복수기(condenser), 응축수(condensing water)를 취수하여 저압급수가열기(low feedwater heater)를 경유하여 급수 계통(feedwater system)으로 이송하는 복수펌프(condensate pump), 그 밖에 복수기내의 비 응축성 가스(non-condensable gas)를 제거하는 에어 이젝터 (air ejector), 터빈 밀봉증기 응축기(gland steam condenser), 복수기 배수펌프(overboard pump)로 구성되어 있으며 공급되는 용수는 계통 내의 부식 생성 및 슬러지를 방지하기 위하여 약품처리를 한다.

3.2.2 설비 현황

원자력발전소의 복수 계통 설비로서는 터빈에서 사용한 증기를 흡수하는 복수기가 터빈 하단부에 설치되어 있다. 터빈과 복수기는 고무벨트로 제작된 익스팬션 조인트(expansion joint)로 연결되어 충격과 진동을 흡수한다. 복수기는 항상 진공상태를 유지하여 터빈에서 나오는 증기를 운전조건에 맞게 충분히 흡수할 수 있는 용량으로 설계되어 있다. 복수기에서 응축된 물은 복수기 하부의 온수조(hotwell)로 수집되어 4대의 복수펌프 흡입원을 제공하고, 복수펌프는 이를 각 계열별 4단계의 저압 급수가열기를 경유하여 급수펌프 흡입측에 송출하는 기능을 하며 주요설비 현황은 표 3.1과 같다.

표 3.1 원자력발전소 복수계통 설비현황

종 류	용 량	수 량	비 고
복수기	6.1121×10 ⁹ Btu/hr	3	
복수펌프	6320gpm, 1250ft, 3000hp	4	
저압급수가열기	전 복수유량의 50%/계열	12	
복수기 배수펌프	650gpm, 50ft, 15hp	1	
Air Ejector	1단(2대):3050lb/h, 2단(1대):1205lb/h	3	

3.2.3 복수펌프 및 전동기

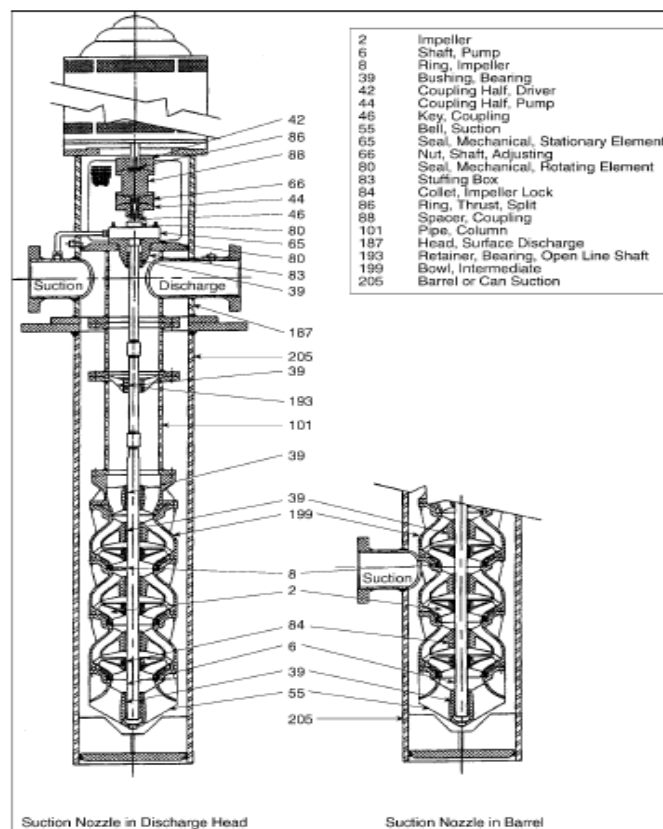
복수펌프는 터빈건물 지하에 설치되어 있는 펌프로써 정격 3000마력의 대형 전동기로 구동되며 6320gpm의 용수를 양정 1250ft로 주급수펌프 흡입측에 공급하는 펌프이다. 펌프의 구성 내용을 살펴보면, 8단의 임펠러와 케이싱이 축에 수직으로 조립되어 지하에 매설된 Barrel에 설치되는 수직형 터보펌프로써 펌프 상부에 전동기가 안착되는 형식이다. 펌프의 밀봉장치는 메카니칼 씰로 되어 있으나 보조적으로 밀봉수가 공급되어 축에서 발생하는 열을 냉각하는 역할도 한다. 복수펌프 및 구동용 전동기에 대한 구조 및 상세사양은 표 3.2 및 그림 3.3에 나타내었다.

표 3.2 복수펌프 및 구동용 전동기의 주요사양

구 분	항 목	사 양
전 동 기	제작사	Westinghouse Electric Co.
	형식	3상 유도전동기
	설치대수	4
	정격마력(Hp)	3000
	회전수(rpm)	1,188
	위상(phase)	3
	주파수(Hz)	60
	극수(pole)	6
	전압(Volt)	13,200
	전부하전류(Amps)	114
	베어링	상부 : 슬리브 저어널 베어링 Kingsbury Thrust 베어링 하부 : 슬리브 저어널 베어링
펌 프	제작사	Dresser Industries INC
	형식	수직형 Barrel원심펌프
	설치대수	4
	단수	8
	깃수(개)	6
	양정(ft)	1250
	유량(gpm)	6320
	회전수(rpm)	1185
	흡입측 임펠러 형식	radial
	베어링	슬리브 저어널 베어링



a) 전동기 설치사진



b) 펌프 구조도

그림 3.3 원자력발전소 전동기 설치사진 및 복수펌프 구조도

3.3 대형 전동기의 점검정비 이력

3.3.1 점검 개요

원자력발전소에서 운전 중인 대형 전동기의 소음과 진동 현상을 파악하기 위하여 2004년 1월 1일부터 2005년 6월 30일까지의 점검정비 이력을 조사하였다. 조사결과 800마력 이상의 전동기로 구동되는 펌프는 표 3.3과 같으며 그 역할은 다음과 같다.

1) 터빈건물 기기냉각수 펌프 : 터빈건물 안에 있는 모든 기기에서 발생하는 열을 제거하기 위하여 냉각수를 공급하는 펌프이다.

2) 1차기기 해수냉각수 펌프 : 원자력발전소 1차측 기기를 냉각시키기 위하여 운전되는 1차 기기냉각수계통의 흡수열을 열교환기를 통하여 바닷물로 냉각시키기 위하여 해수를 공급하는 펌프이다.

3) 2차기기 해수냉각수 펌프 : 2차측 터빈건물 안에 있는 기기를 냉각시키기 위하여 운전되는 2차 기기냉각수계통의 흡수열을 열교환기를 통하여 바닷물로 냉각시키기 위하여 해수를 공급하는 펌프이다.

4) 급수가열기 배수펌프 : 터빈을 구동한 후 추출된 증기(extraction steam)를 응축하여 회수된 물을 다시 급수계통에 공급하는 펌프이다.

5) 해수 순환수펌프 : 터빈구동에 사용한 후 나오는 증기를 복수기(condenser)에서 물로 회수하는 데, 이때 추기증기를 냉각시키기 위하여 사용되는 해수를 공급하는 펌프이다.

6) 복수펌프(condensate pump) : 터빈에서 사용된 증기가 복수기에서 응축되어 물로 바뀌는 데 이를 다시 급수계통에 공급하기 위하여 운전되는 펌프로 송출된 물은 열효율을 상승시키기 위하여 4단의 저압 급수가열기(low feedwater heater)를 경유하여 급수를 예열한 후 주급수펌프(main feedwater pump) 흡입측으로 공급된다.

3.3.2 대형 전동기 점검정비 이력

고리원자력발전소 3, 4호기 2차 계통 설비에 설치된 800마력 이상의 대형펌프용 전동기 40대에 대하여 2004년 1월 1일부터 2005년 6월 30일까지의 고장정비 이력을 조사한 결과, 총 304건의 점검요구 사항이 발행되었다. 발행된 내용을 살펴보면 대부분이 절연저항 측정 등 일반적인 점검사항이었으며, 본 논문에서 관심을 갖고자 하는 소음진동 분야는 8건이 추출되었다. 그 중에서 2차 계통에서 가장 큰 복수펌프 전동기의 소음진동 진단 및 분석을 본 논문의 연구과제로 설정하였다.

표 3.3 대형 전동기의 점검정비 이력

(조사기간: '04.01.01 ~ '05.06.30)

기 기 명	용 량 (Hp)	설 치 대 수	점검정비이력		비 고
			총 점검횟수	소음진동 점검횟수	
터빈건물 기기냉각수펌프	800	4	34	2	
1차기기 해수냉각수펌프	900	8	70	0	
2차기기 해수냉각수펌프	960	4	27	2	
급수가열기배수펌프	1,750	4	34	0	
해수순환수펌프	1,750	12	93	3(5)*	
복수펌프**	3,000	8	46	1	
계		40	304	8	

* 동일한 사항 3건을 1건으로 처리하였음.

** 연구과제 대상의 표본설비

4. 전동기 결함

산업현장에서 사용되고 있는 전동기는 다른 회전기계에 비하여 비교적 간단한 구조를 가지고 있다. 그러나 전기에너지를 기계에너지로의 변환과 관련된 각종 스트레스(stress)에 기인하는 초기결함(initial fault)의 발생 가능성은 전동기에서는 불가피한 현상이다. 유도전동기의 결함을 확인(identification)하는 방법에는 전류, 회전속도, 효율(efficiency), 온도 그리고 진동과 같은 전동기의 상태량을 이용한 방법들이 이용되고 있다. 특히, 전동기를 비롯한 회전기계에서 발생하는 결함을 진단하는 주요 방법 중에 하나가 고장발생으로 야기된 진동 상태량을 분석하는 것이다. 여러 가지 신호처리 기술을 이용하면 치명적인 고장에 도달하기 전에 중요한 결함정보를 취득하는 것이 가능하다. 그리고 전동기의 고정자 전류신호를 이용한 전류신호분석(Motor Current Signature Analysis : MCSA) 기술이 회전자 봉 파손(broken rotor bars)과 공극편심(air gap eccentricity)등의 결함을 진단하는 주요 기술로서 산업분야에서 널리 이용되고 있다.

4.1 결함 개요 ^(5,6,10,15)

다른 전기 회전기계와 유사하게 유도전동기는 전자기력(electromagnetic force)과 기계적 힘(mechanical force)의 영향을 받게 된다. 정상상태에서는 두 힘 사이의 안정된 상호작용으로 작은 진동과 소음을 발생시키며 안정적으로 운전된다.

그러나 결함이 발생하게 되면 전자기력과 기계력의 평형(equilibrium)을 잃게 되고 결함이 점차 성장하게 된다. 전동기에서 발생하는 결함은 크게 전기적인 결함과 기계적인 결함으로 나눌 수 있다. 발생 결함들은 진동 및 전류신호의 스펙트럼을 비교해보면 각자 고유한 특징을 가지고 있다. 대부분의 전기적인 문제는 진동스펙트럼 분석에서 전원주파수(line frequency)의 2배 성분에서 정상상태보다 높은 진동 진폭이 발생하게 되며, 기계적인 문제는 운전주파수 성분이 탁월하다. 불평형과 정렬불량 등의 기계적인 문제가 회전자(rotor)와 고정자(stator) 사이의 공극(air gap) 변화와 같은 전기적인 문제를 발생시킨다. 따라서 기계적인 문제를 먼저 검토하고 그 원인을 제거한 후 전기적인

문제를 검토하는 것이 바람직하다. 그림 4.1과 그림 4.2는 각각 미국 전력연구소(EPRI)와 국제전기전자기술자협회(IEEE)에서 조사한 유도전동기에서 발생하는 주요 결함이 차지하는 비율을 보여주고 있다. 결함의 주요한 형태는 베어링 결함과 고정자 결함이 대부분을 차지하고 있음을 보여주고 있다.

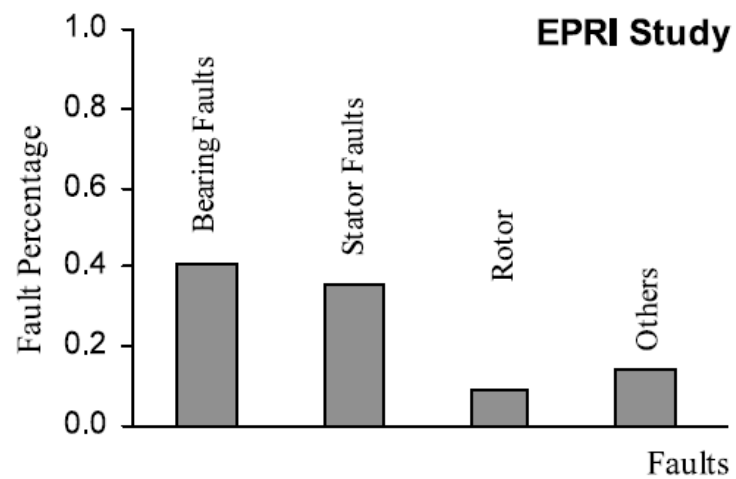


그림 4.1 유도전동기 결함에 대한 미국 EPRI 연구결과

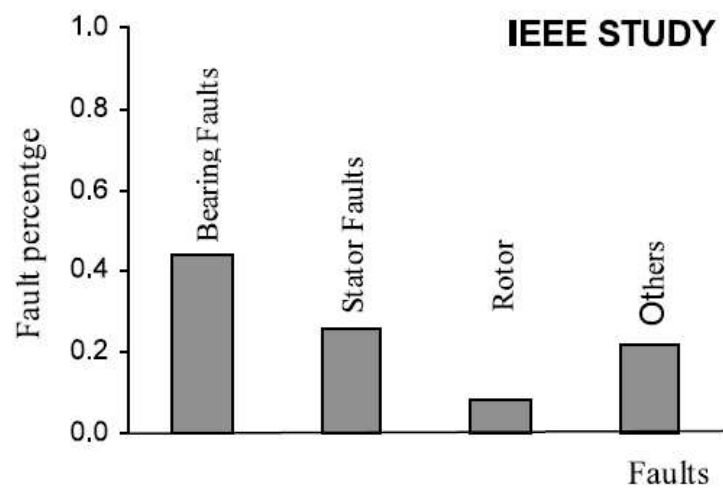


그림 4.2 유도전동기 결함에 대한 IEEE 연구결과

일반적으로 유도전동기는 이와 같은 주요 결함형태와 이것에서 파생된 2차 결함의 지배를 받게 된다. 전동기 결함의 발생원인은 그림 4.3에서 보이는 것과 같이 내부(internal) 및 외부(external) 요인으로 분류할 수 있다. 내부결함은 다시 기계적 요인과 전기적인 요인, 외부결함은 전기적 요인과 기계적 요인 그리고 환경적 요인에 의해서 발생하는 것으로 분류할 수 있다.

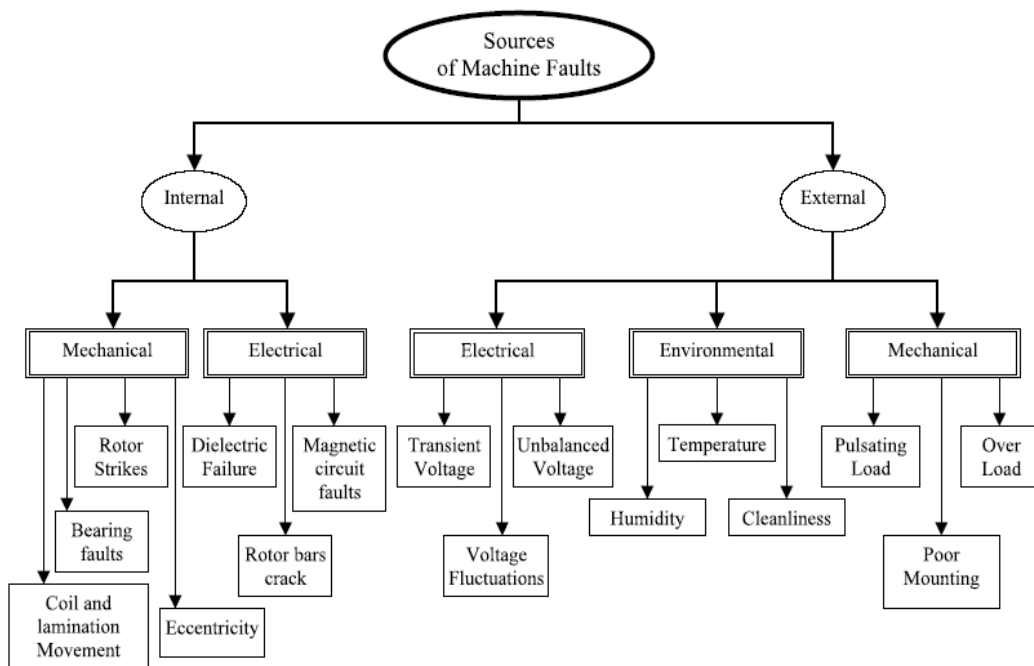


그림 4.3 유도전동기의 결함발생 원인

4.2 기계적인 결함

회전기계에 영향을 미치는 기계적인 결함들은 또한 전동기에서도 동일한 문제를 일으킨다. 회전자(rotor)의 기계적인 결함으로는 정적 편심(static eccentricity)과 동적 편심(dynamic eccentricity) 그리고 정렬불량(misalignment)이 있고 고정자(stator)의 기계적 결함으로는 고정자의 편심(stator eccentricity)과 권선 이완(core slacking)이 주를 이룬다. 더욱이 회전자의 편심을 발생시키는 베어링 결함은 유도전동기에서는 가장 흔한 기계적 결함이다. 그리고 회전자의 마찰(rubbing), 고정자와 회전자의 피로(fatigue)와 같

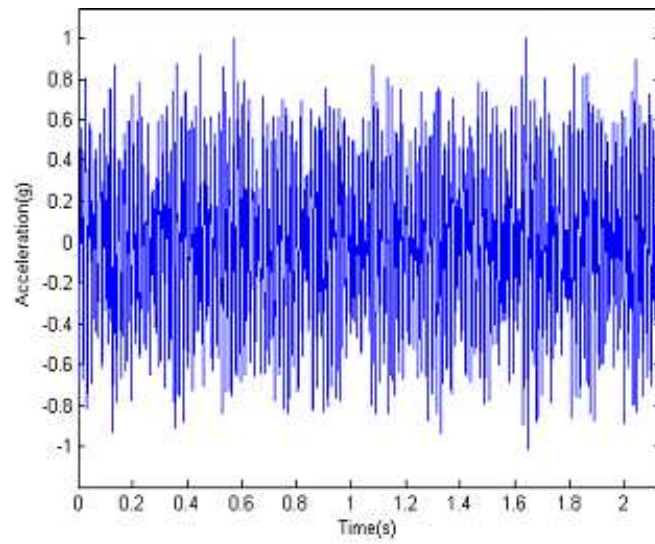
은 결함은 위에서 언급한 주요 결함에 의해서 2차적으로 발생하는 결함들이다. 표 4.1은 기계적 결함 중에서 베어링과 축 그리고 커플링의 결함을 정리한 것이다.

표 4.1 기계적인 결함

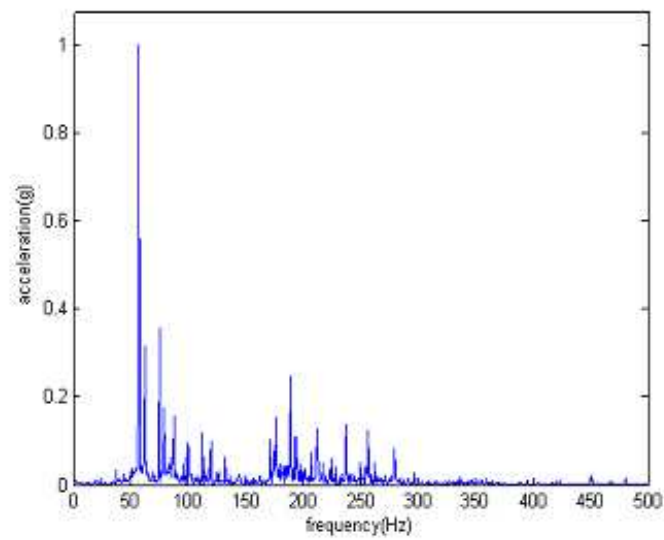
결함요소	기계적 결함
베어링(bearing)	• 구름요소베어링 결함(bearing defect) • 저어널베어링 결함(oil whip/whirl)
축(shaft)	• 질량 불평형(mass unbalance) • 축 굽힘(bent shaft) • 헐거움(looseness) • 접촉(rubbing) • 공진(resonance)
커플링(coupling)	• 정렬불량(misalignment)

4.2.1 불평형

불평형은 회전체의 기하학적인 중심(축 중심선)과 질량중심이 일치하지 않는 경우에 발생되며 회전체를 제작할 때나 조립할 때의 작업정도에 의해 발생한 오차 또는, 운전시의 마모나 부식에 의한 변형이 원인이 된다. 불평형력은 회전주파수로 발생되며 때로는 정렬불량과 혼동되기 쉽다. 그러나 불평형은 반경방향의 회전력을 발생시키지만 정렬불량에 의한 가진력은 방향성을 가진다. 일반적인 기계구조물에서는 수평방향의 진폭이 수직방향에서 측정된 진폭보다 크게 나타난다. 기계의 구조에 따라서 질량 불평형으로 인해서 베어링 지지대에서 운전속도 성분의 큰 축 방향 진동이 발생할 수 있다.



(a) Time signal



(b) Frequency spectrum

그림 4.4 불평형 상태의 진동 신호

4.2.2 정렬불량⁽¹³⁾

3개 이상에서 반경방향의 하중을 가하는 베어링을 가진 회전체와 같이 과도하게 지지가 된 회전체의 정렬불량은 베어링, 축 그리고 외부 커플링에서 축 속도의 주파수로 회전하는 예하중(pre-load)을 일으킨다. 결과적으로 진동의 크기는 계(system)를 구성하는 요소들인 베어링, 축, 씸(seal), 커플링 등의 반경방향 강성에 좌우된다. 정렬불량이 심해지면 베어링의 비대칭성과 베어링 지지대 그리고 기초의 강성에 따라 한쪽 혹은 양방향으로 비선형적인 베어링 특성을 일으킬 수 있다. 정렬불량이 있으면 회전축이 강제적으로 굽혀지기 때문에 외관상의 초기 굽힘이 생기고 그것에 의해 진동이 발생된다. 베어링의 정렬불량은 불완전하게 베어링을 설치하였을 때 발생하는 흔한 결과이며 그림 4.5에 4가지 유형을 나타내었다.

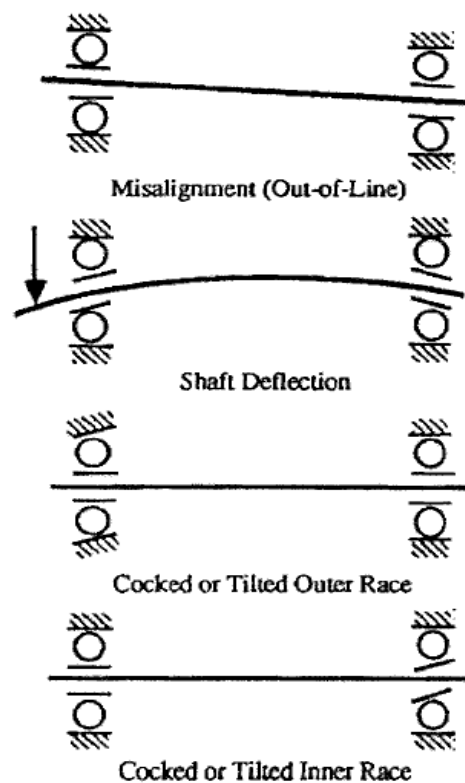


그림 4.5 구름요소베어링 정렬불량의 4가지 유형⁽¹³⁾

4.2.3 이완(looseness)

이완된 기계요소는 1회전당 1회의 충격이 발생되어 운전주파수의 진동과 차수 성분들의 진동이 나타난다. 통상 헐거움이 있으면 f_0 , $2f_0$, $3f_0$ 의 조화 성분이나 $1/2 f_0$, $1/3 f_0$ 인 분수조화진동이 발생될 수 있다. 고유진동수 혹은 그에 근접한 차수의 성분은 공진에 의해서 가진력이 증폭되기 때문에 큰 진동이 발생된다.

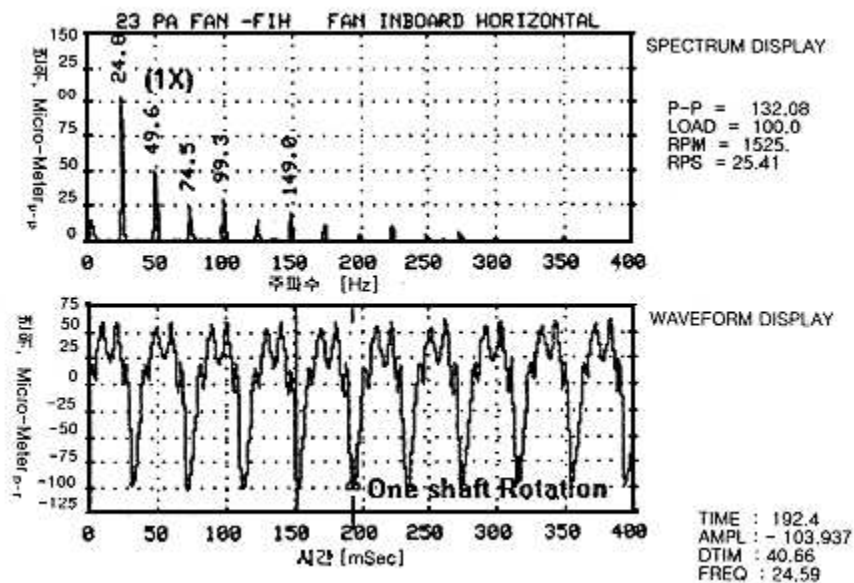


그림 4.6 기계적 이완 상태의 진동신호⁽¹⁸⁾

4.3 전기적인 결함

권선(winding)결함, 예를들면 turn to turn, phase to phase 그리고 winding to earth 결함, 회전자 봉의 균열(crack)과 느슨함(slack) 그리고 단락 링(end ring)의 불량연결 등은 전기적인 결함의 원인이 된다. 전기적인 결함은 전원주파수의 2배 진동과 극수에 슬립(slip)주파수를 곱한 측대역 성분에서 이상신호를 발생시킨다. 회전자나 고정자의 슬롯(slot) 수에 전동기 속도를 곱한 것과 동일한 주파수의 진동은 편심된 전동기 혹은 고정자와 전동기의 슬롯(slot) 수가 유사할 때에 발생된다. 표 4.2는 전기적인 결함에 대한 결함요소들을 나타내었다.

표 4.2 전기적인 결함

결함요소	결함내용
공극(air gap)	• 공극 불평형(고정자 및 회전자 편심)
회전자(rotor) 단락 링(end ring)	• 회전자 봉의 파손/크랙 • 회전자 봉의 헐거움/개방 • 회전자 적층의 단락 • 회전자의 불규칙한 국부 가열에 의한 열 굽힘(thermal bow) • 단락 링의 파손/균열
고정자(stator)	• 유연한 고정자 • 고정자 적층(lamination)의 단락 • 고정자 철심의 느슨함

4.3.1 공극의 편심문제

(1) 정적 편심

고정자와 회전자 사이의 축심이 일치하지 않고 편심이 발생하게 될 때 일어나는 현상으로 최소 공극의 위치를 통과할 때 공극이 작은 곳에서는 자기흡입력이 크게 작용하고 반대로 최대틈새 지점에서는 자기 흡입력이 최소가 되어 불평형 전자력이 발생하게 된다. 이 때문에 전동기에서는 전원주파수 2배 성분을 갖는 전자진동이 발생한다.

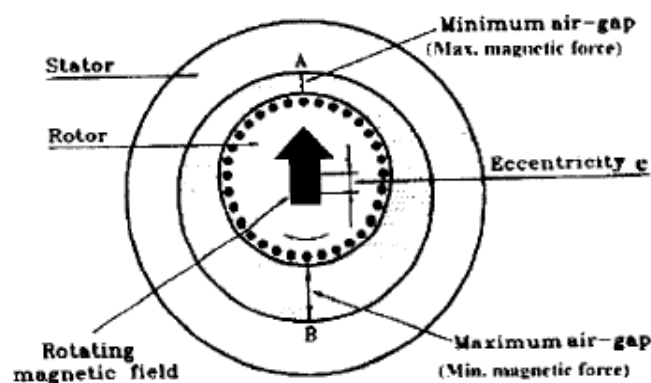


그림 4.7 공극의 정적 편심

(2) 동적 편심

경년변화나 외력에 의해 발생하는 축 굽힘(shaft bent)이나 회전자의 중량 불평형 등에 의한 휘돌림의 원인으로 회전자에 고정자 내에서 최소 공극점이 편심으로 휘도는 것에 의해 기계적인 진동이 불평형 전자력을 조장하게 되어 불평형 전자력 $2s \times$ 전원주파수의 2배 성분(여기서 s 는 전동기 슬립)으로서 맥동한다. 그리고 전동기 부하를 증가하면 슬립(s)이 크게 되기 때문에 주기는 짧게 되며 전동기는 진동의 맥동에 의해 맥놀이(beat) 음을 발생하게 된다.

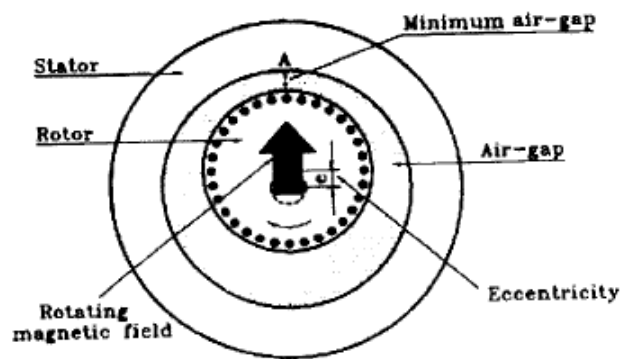


그림 4.8 공극의 동적 편심

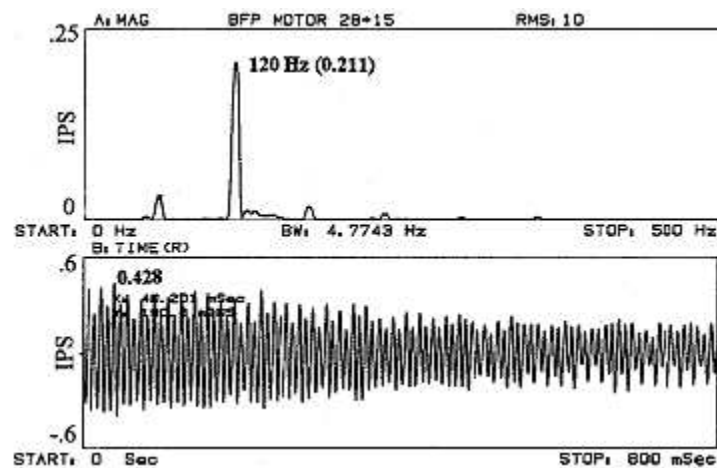


그림 4.9 공극에 문제가 있는 전동기의 진동신호⁽¹⁸⁾

4.3.2 회전자 문제

회전자 봉의 파손이나 헐거움 또는 회전자 봉과 단락 링(end ring) 사이의 접촉이 단락되는 결함들은 전동기 부하와 체결되어 있는 경우에만 명백하게 나타난다. 회전자 봉(rotor bar)이 파손되면 운전주파수 주위에 극수(number of pole)와 슬립주파수(slip frequency)를 곱한 것과 같은 간격의 측대역(side band) 성분들이 나타난다. 결과적으로 운전속도의 진동이 나타난다. 아래의 표 4.3은 회전자에서 발생하는 문제와 발생증상을 정리한 것이다.

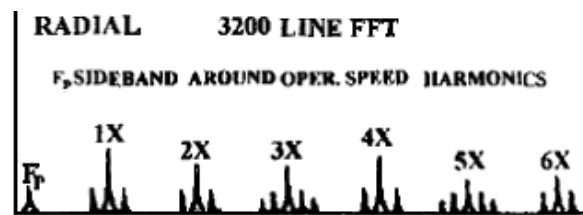


그림 4.10 회전자에 문제가 있는 진동신호⁽¹⁸⁾

표 4.3 회전자의 문제점 및 증상

회전자 문제	발생 증상
- 회전자 봉과 단락 링의 파손/균열 - 회전자 봉과 단락 링 사이의 불량 결함 - 회전자 적층의 단락	운전속도(1X) 성분의 높은 진동과 극 통과 주파수의 측대역 성분 발생
균열이 발생한 회전자 봉	운전속도(1X)의 높은 진동과 극 통과 주파수의 측대역과 성분 발생. 종종 조화 성분(2X, 3X, 4X, 5X)의 주위에 극 통과 주파수의 측대역과 성분 발생
헐겁거나 개방된 회전자 봉	회전자 봉 통과주파수와 이의 조화 성분 및 주위에 전원주파수 X 2배 성분의 측대역과 성분
회전자 봉과 단락 링 사이의 전기적 아크	(2X전원주파수 2배 성분)과 (2X회전자 봉 통과주파수)성분의 높은 레벨

(1) 회전자 적층의 단락

회전자 철심의 적층은 회전자 철심을 절연하고 전류 흐름을 방지하기 위한 것이 목적이므로 슬롯(slot)에서 권선을 제외한 표면의 단락은 이 목적을 파괴하고 높은 국부적인 가열을 발생시킨다. 다음은 회전자 적층의 결함원인을 나열한 것이다.

- 과대한 거친 부분과 불량한 철심 적층 정렬
- 회전자 외경의 부적절한 가공
- 고정자와 회전자의 마찰(rubbing)
- 철심판의 부적절한 절연이나 절연결합

(2) 회전자 봉 파손

회전자 봉의 파손 또는 헐거움은 전동기가 부하측과 체결되어 있는 경우에 발생되며 운전 주파수 부근에서 극수와 슬립주파수를 곱한 극 통과주파수와 같은 간격의 측대역 성분이 발생된다, 전동기 내에서 높은 저항이 발생하는 상황이 되면 슬립주파수와 극 통과 주파수에 해당하는 주파수가 전류 스펙트럼에서 나타나게 된다. 저항의 측정은 데시벨로 계산되어진다.

$$20 \text{ Log}(A/B) = \text{dB}$$

여기서 A 는 전원주파수 진폭, B 는 슬립주파수 진폭이다.

저항이 증가할수록 dB 는 감소하게 된다. 저항의 증가는 일반적으로 회전자 봉의 파손에 기인하며 연결불량(bad or loose connection), 파손된 단락 링(broken end ring) 그리고 불량한 납땜 연결부에서도 원인을 찾을 수 있다

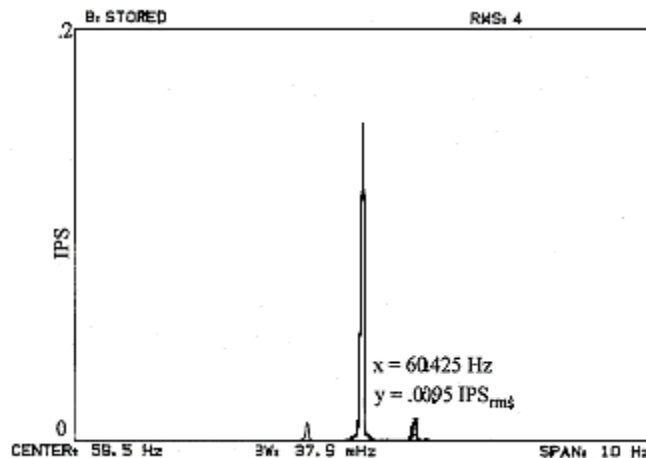


그림 4.11 회전자 봉이 파손된 전동기의 진동신호⁽¹⁸⁾

(3) 헐겁거나 개방된 회전자 봉

회전자 봉 통과 주파수의 매우 높은 주파수의 진동과 이의 조화성분들이 발생하고 조화성분 주위에는 정확하게 전원주파수 2배 성분의 측대역파(sideband) 성분이 존재한다.

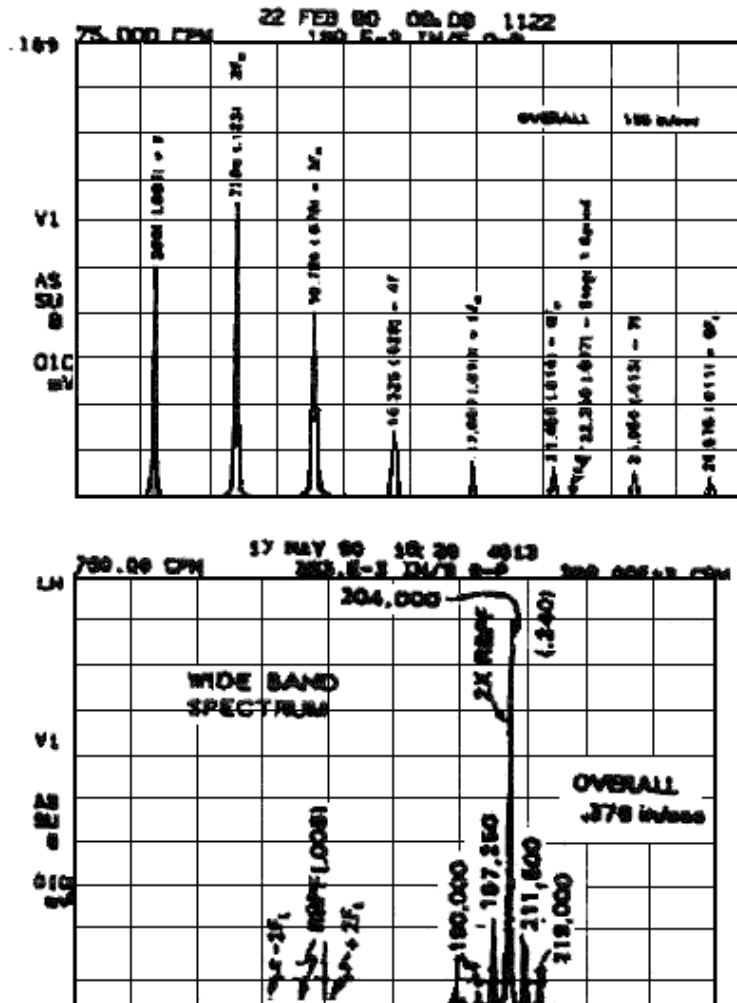


그림 4.12 회전자 봉이 헐겁거나 개방된 전동기의 진동신호⁽¹⁸⁾

4.3.3 고정자 문제

고정자와 회전자 사이에는 자극에 의한 전자력(흡입력)이 있고 고정자를 변형시키도록 작용하므로 진동을 발생시킨다. 고정자 이상에 의한 진동의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 진동수는 전원주파수의 2배
- 전동기 전원을 차단하면 이 진동성분은 한순간에 소멸
- 고정자 프레임이나 베어링 등에 발생
- 극 통과주파수의 측대역 성분이 발생되지 않음

(1) 고정자 편심(Stator Eccentricity)

고정자 편심의 원인은 연약지반과 뒤틀림 기초에 의해서 발생되며 매우 지향성의 진동을 발생시키는 회전자와 고정자 사이의 불균일한 정지된 공극을 발생시킨다.

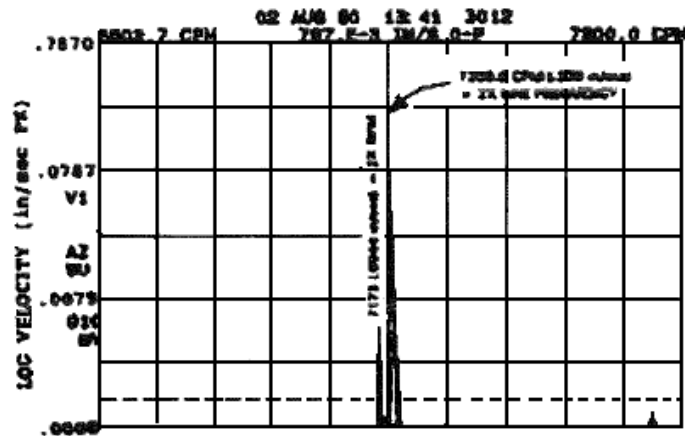


그림 4.13 고정자 편심의 진동신호⁽¹⁸⁾

(2) 고정자 적층 및 권선 단락(Shorted Stator Laminations)

고정자 적층 단락은 불량 철심구조로부터 발생되는 데 예를 들면 불량 적층정렬, 너무 무겁거나 혹은 너무 가벼운 철심압력 등을 들 수 있다. 일반적으로 고정자와 회전자 모두가 진동이 두드러지게 증가하면 철심 단락의 징후를 나타낸다. 고정자 권선 단락의 경우는 전원주파수의 2배 성분과 그 배수 성분들의 반경방향 진동이 탁월하다. 모든 회전기계는 진동을 야기한다. 심지어 정상상태의 건강한 전동기나 새롭게 제작된 전동기도 어느 수준의 진동은 있다. 하지만 높은 수준의 진동진폭과 그것이 계속해서 증가하는 경향을 보이는 것은 전동기의 이상상태(abnormal)를 나타내는 증상이다. 전동기의 운전에 있어서 구성요소의 변화와 손상은 동적특성을 변화시켜 진동수준을 증가시킨다. 특정 위치에서의 진동진폭의 크기는 주로 진동을 발생시키는 근본적인 힘과

전동기 구조의 기계적 응답, 마운팅(mounting)에 의존한다. 또한 진동응답은 진동의 주파수 모드에 의존한다, 그래서 진동의 특정모드에 대한 주파수에서 전동기의 응답이 작다면 상대적으로 큰 힘도 작은 진동을 발생시킨다. 한편 공진주파수 또는 이 근처에서 전동기 구성요소에 특정한 진동모드를 발생시키는 비교적 작은 힘도 상당한 진폭의 진동을 발생시킨다. 결과적으로 전동기에서 발생한 진동을 줄이기 위해서는 진동을 발생시키는 근본적인 힘의 크기를 감소시키거나 전동기 자체의 구조와 지지대를 수정하여야 한다.

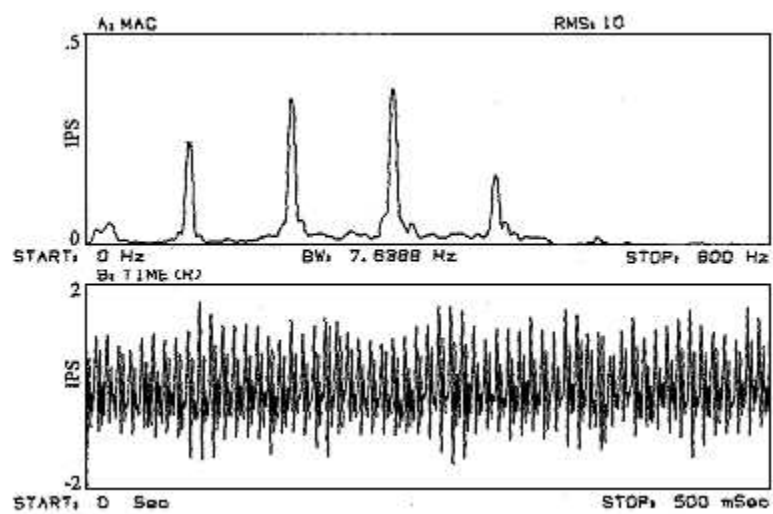


그림 4.14 고정자 권선이 단락된 전동기의 진동신호⁽¹⁸⁾

5. 신호 측정 및 분석

5.1 신호 측정

5.1.1 개요

소음이란 인간이 청력기관을 통해 느끼는 불쾌한 소리로서 발전소와 같이 많은 기계가 동시에 운전되고 있는 실내에서의 소음발생은 운전원의 건강을 해치고 작업능률을 저하시킨다. 또한 비정상적인 소음은 운전 중인 기계의 이상상태를 나타내는 것으로 이에 대한 원인과 특징을 조기에 발견함으로써 기기의 신뢰성 향상과 수명향상에 도움이 된다. 따라서 원자력발전소 2차 계통의 주요 펌프인 복수펌프 전동기의 소음진동을 진단하기 위하여 전동기에서 4m의 이격거리를 두고 그림 5.1과 같이 마이크로폰을 사용하여 소음을 측정하였다. 또한, 전동기의 진동을 측정하기 위하여 상부 베어링에 가속도센서를 설치하였고, 전류분석을 위하여 그림 5.2와 같이 후크미터를 설치하였다.

5.1.2 신호측정 장비

- 진동소음 측정 : 마이크로폰, 가속도센서
- 전류신호 측정 : 후크미터센서
- 분석장비 : LMS Test Lab 시스템, DI-2200



그림 5.1 소음, 진동 측정장면



그림 5.2 전류측정용 후크미터센서

5.2 신호 분석

5.2.1 진동속도 분석

그림 5.3은 복수펌프 구동용 전동기의 진동속도로서 최대진폭이 1.15mm/s, pk이고 실효치가 1 mm/s, rms 이상으로 나타났다. 전동기 상부의 주 진동주파수는 1X 성분이었고 크기는 0.55mm/s, rms이며 0.8Hz의 극통과 주파수가 측대파(side band)로 나타났다.

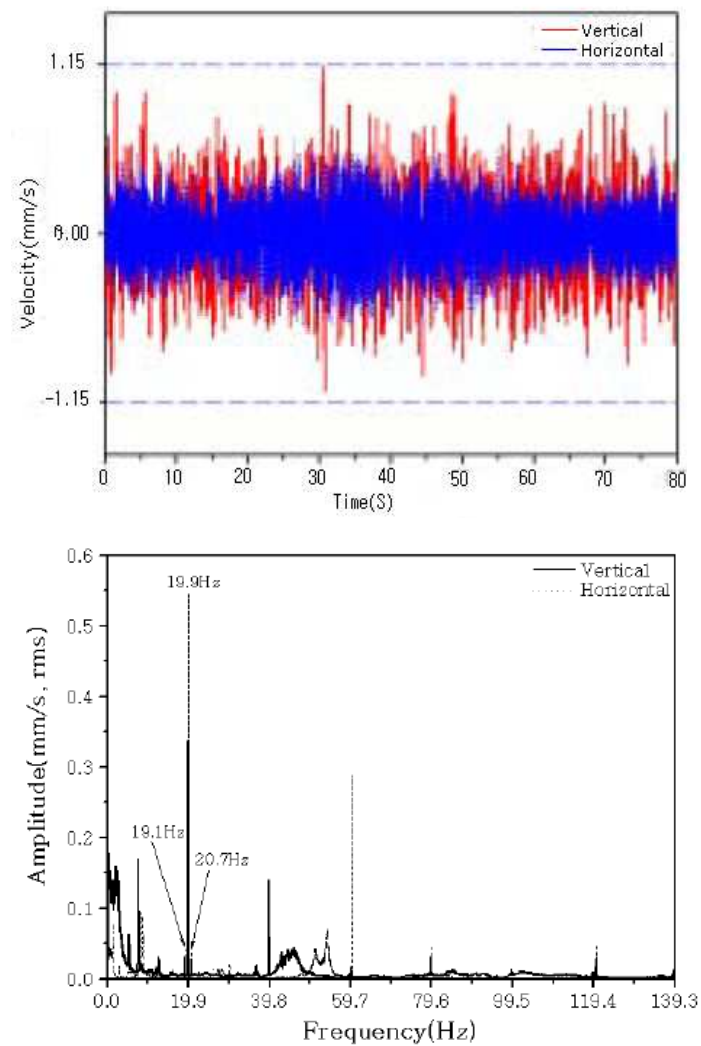


그림 5.3 복수펌프 구동용 전동기의 진동속도 파형(위) 및 스펙트럼(아래)

5.2.2 진동 가속도 분석

그림 5.4는 전동기 상부의 진동가속도 파형을 보여준다. 상부 그림은 전동기 가속도의 시간파형이고 최대진동이 1.5mm/s^2 미만으로 운전되고 있음을 보여주며 하부 그림은 주파수에 따른 스펙트럼을 보여주고 있다.

측정된 소음을 FFT 주파수 분석 및 웨이블렛 분석결과 회전자 봉(rotor bar)의 통과주파수(rotor bar pass frequency, RBPF)로 추정되는 1490Hz에 대하여 120Hz 간격의 진동성분들이 1kHz 이후에 나타나지만, 그림 5.4와 같은 진동 가속도 FFT주파수 분석에서는 신호가 잘 나타나지 않았다.

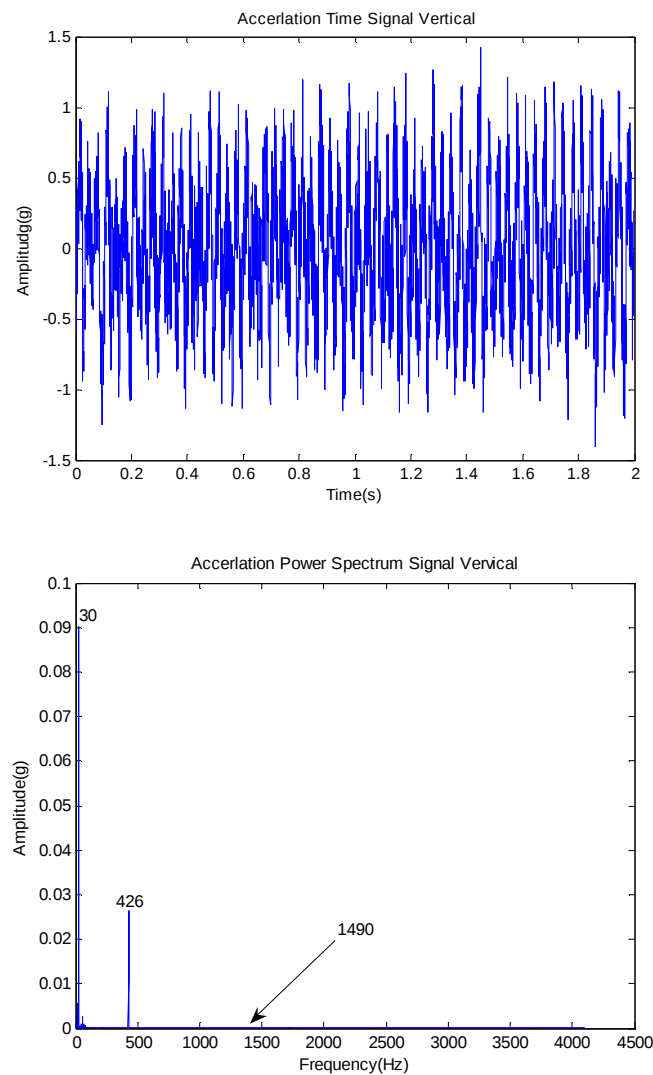
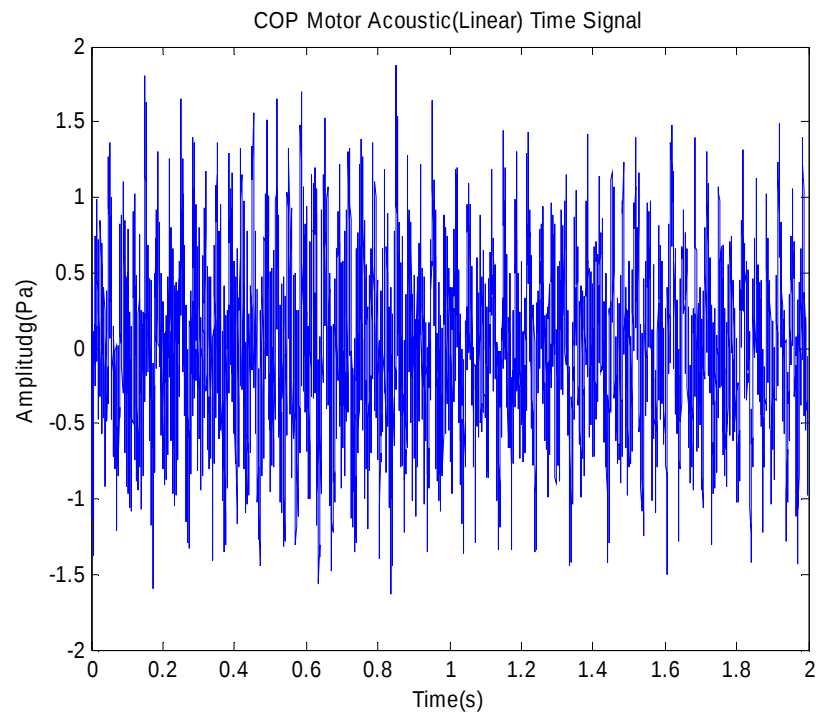


그림 5.4 복수펌프 구동용 전동기의 진동가속도 파형(위) 및 스펙트럼(아래)

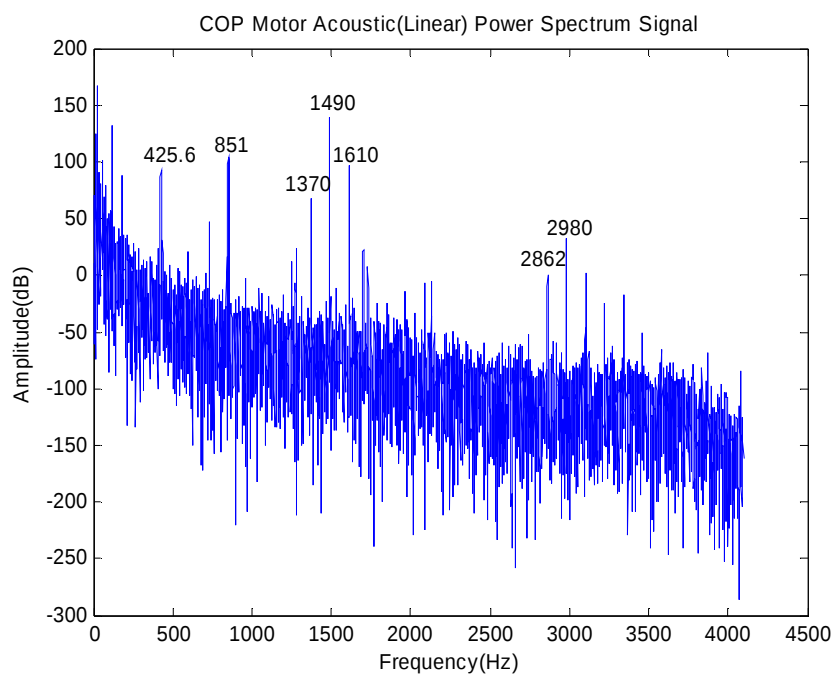
5.2.3 소음측정 및 주파수분석

마이크로폰을 사용하여 측정한 소음을 Power Spectrum FFT분석 기법을 이용하여 Linear 및 A Weighting으로 측정된 소음을 시간 및 주파수 대역별로 파형 및 스펙트럼을 분석하였다.

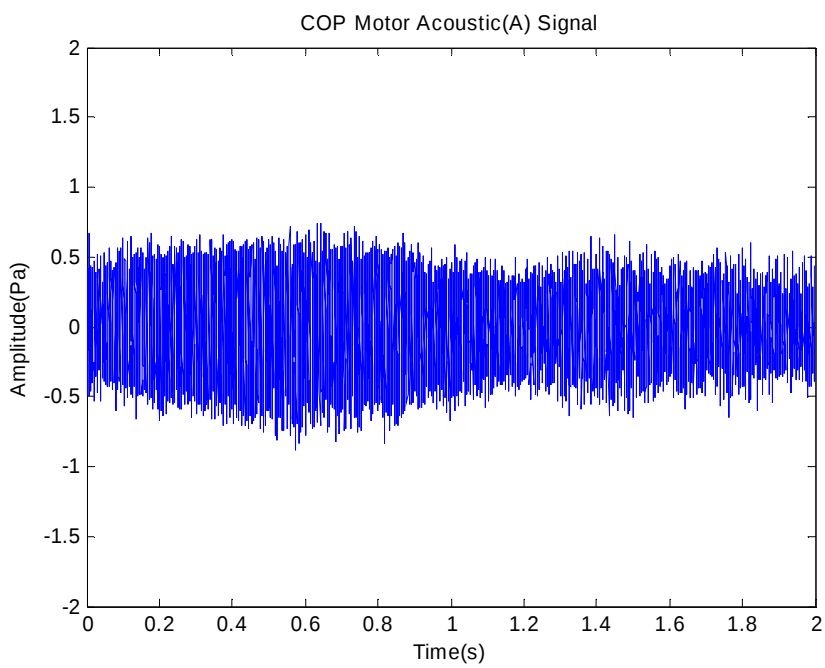
분석결과, 전동기의 소음파형 및 스펙트럼에서 보이는 바와 같이 1490Hz 주위의 파형 및 120Hz의 측대파에서 가장 높은 소음레벨이 나타났으며, 이것의 2배 고조파 성분인 2980Hz에서도 주변보다 높은 음압과 측대파가 나타났다. 또한 그림 5.5 (c)에서의 파형은 맥동현상으로 주 원인은 회전자와 고정자 사이의 공극(air gap)에 의하여 나타나는 현상인 RBPF의 영향으로 분석된다. RBPF와 측대파 및 고조파들의 진폭증가는 공극이 변했거나 회전자 봉이 이완 또는 단락 징후 등이 있을 때 발생하는 것으로 추정되지만, 해당 시스템에 대한 추이분석을 통하여 정확한 판단을 하여야 한다.



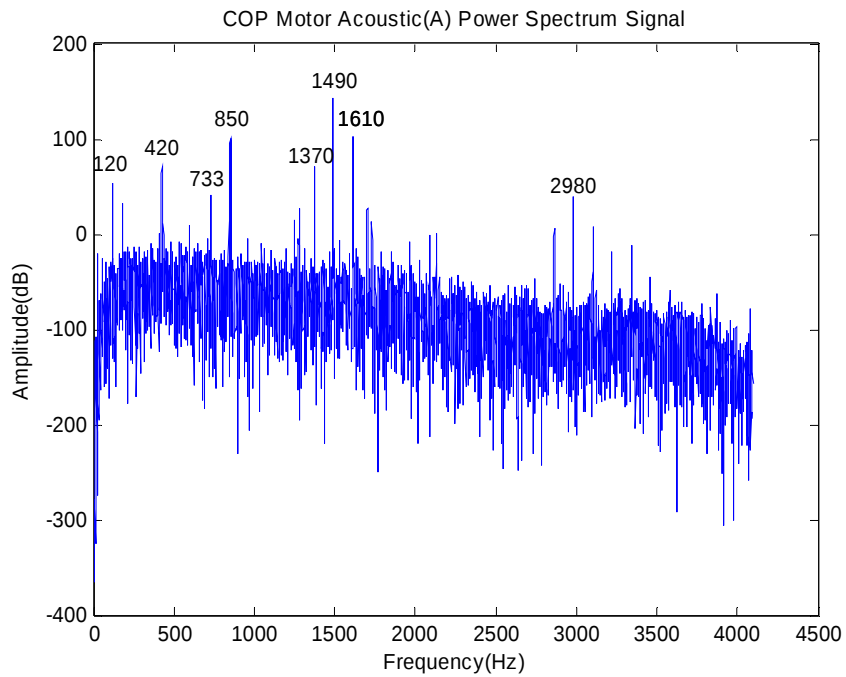
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5.5 복수펌프 구동용 전동기의 소음 파형 및 스펙트럼

5.2.4 전동기의 입력전류 분석

구동중인 전동기에서 나타나는 진동 및 소음 현상은 전동기 내부의 부하에 영향을 주게 되며 전류에 그 특성이 변조되므로 복수펌프 구동 전동기의 부하 입력전류 단에 후크미터를 그림 5.2와 같이 설치하여 입력전류의 특성을 분석함으로써 전동기 회전자의 상태를 진단하고자 하였다.

(1) 전류 진폭 현황

발전소 복수펌프 구동전동기 전기제어반에서 인입전류 B상의 측정 전류값을 분석한 결과, 0.1초 동안의 전류파형 신호가 그림 5.6과 같이 나타났으며 최대 전류값은 116A, pk(82A, rms)로 분석되었다.

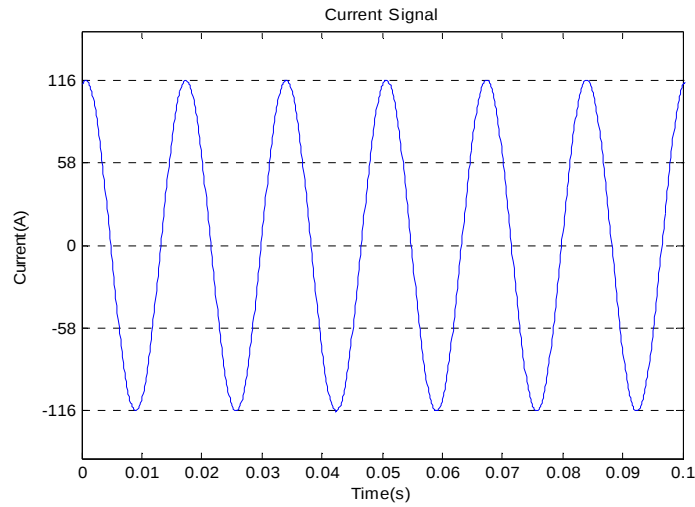


그림 5.6 복수펄프 구동용 전동기의 전류파형

(2) 회전자 봉의 상태조사

유도전동기에 결함이 있는 경우 부하전류에 변화가 생기므로 전류에 결함 특성이 변조된다. 진동신호로 감지되는 경우는 그림 5.3과 같이 회전자의 회전 주파수에 극통과 주파수가 변조되어 양측에 측대파로 나타나는 반면 전기신호에서는 회전자에 결함이 있는 경우 전동기의 극통과 주파수가 전원주파수의 양쪽에 측대파로 변조된다. 전동기 회전자 봉의 건전성 평가는 전원주파수와 극통과주파수가 변조된 측대파 사이의 dB 레벨차로 정의할 수 있으며, 표 5.1의 기준에 따라 보통 레벨차가 60dB 이상이면 회전자 봉의 상태는 양호한 것으로 판정한다.

표 5.1 회전자 봉의 손상 심각도 평가 기준⁽⁴⁾

ROTOR BAR DAMAGE SEVERITY LEVEL CHART					
Severity level	F_L / F_P (dB)	F_L / F_P (Ratio)	F_P / F_L (Ratio %)	Rotor Condition Assessment	Recommended corrective action
1	>60	>1000	<0.10	Excellent	None
2	54-60	501-1000	0.10-0.20	Good	None
3	48-54	251-501	0.20-0.40	Moderate	Trend data
4	42-48	126-251	0.40-0.79	Rotor bar crack may be developing or problems with high resistance joints	Increase trending frequency
5	36-42	63-126	0.79-1.58	One or two rotor bars likely cracked or broken	Perform vibration test to confirm source & severity
6	30-36	32-63	1.58-3.16	Multiple cracked or broken rotor bars	Repair ASAP
7	<30	<32	>3.16	Multiple cracked or broken rotor bars & end-rings	Repair or replace ASAP

그림 5.7은 복수펌프 구동용 전동기의 전류스펙트럼을 나타낸 것으로 전원 주파수와 측대파의 레벨편차를 구한 것으로, 표 5.1의 기준에 따르면 회전자 붕의 상태는 양호한 것으로 판단할 수 있다.

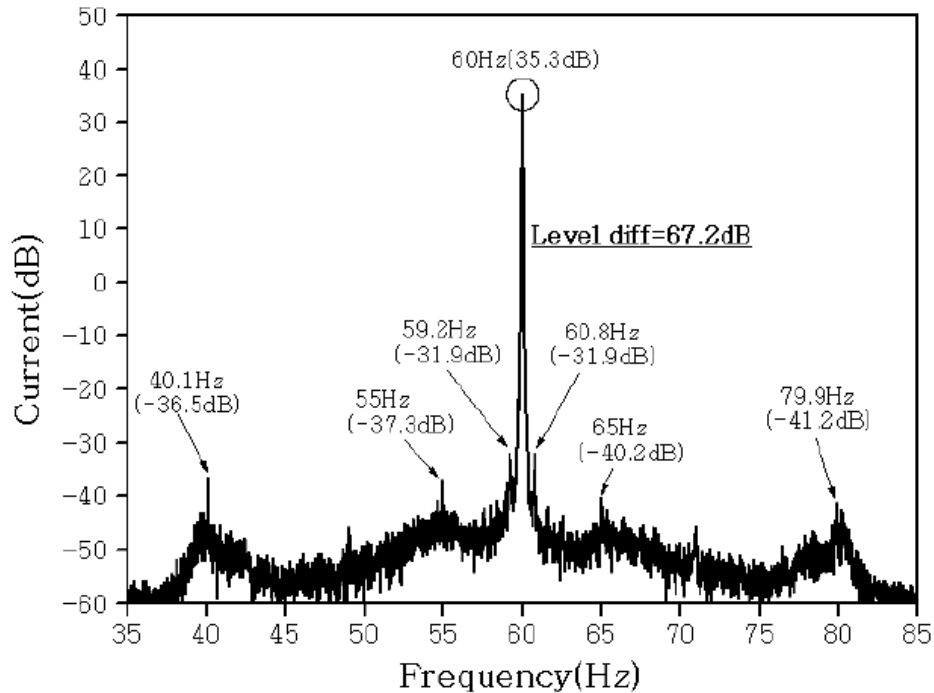


그림 5.7 복수펌프 구동용 전동기의 전원주파수와 측대파의 레벨편차

(3) 시스템의 편심상태 조사⁽⁴⁾

회전자에서는 정적 편심 및 동적 편심의 두 가지 형태로 편심이 나타난다. 전자는 고정자와 회전자 사이의 축심이 일치하지 않고 편심이 발생하게 될 때 일어나는 현상이며, 후자는 고정자 중심에 대해서는 편심이 없으나 회전자가 고정자 안에서 최소 공극점이 편심으로 휘도는 것에 의해 발생하는 기계적 진동이 불평형 전자력을 조장하게 되는 중심에서는 편심이 존재하는 경우로 그림 5.8에서 전동기 회전자와 고정자의 정적 편심 및 동적 편심에 대한 기본개념을 나타내고 있다.

정적 편심은 타원형 고정자 철심에 의해 나타나며 설치단계에서 회전자 또는 고정자의 부정확한 위치가 정적 편심의 원인이 될 수 있다. 회전자 축 조립이 매우 견고한 경우 정적 편심은 크게 문제되지 않는 반면 동적 편심은 회전자의 중심이 회전중심에서 이탈되어 있어 최소 공극이 회전자와 함께 회전하는 경우에 나타난다.

동적 편심으로 인해 회전자의 휨, 기계적 공진, 베어링 손상이 발생할 수 있고, 동적 편심이 증가하면 회전자에 과도한 불평형 자력(unbalanced magnetic pull)을 발생시켜 회전자와 고정자 사이의 마찰위험이 증가하므로 공극편심의 상태감시가 중요하다.

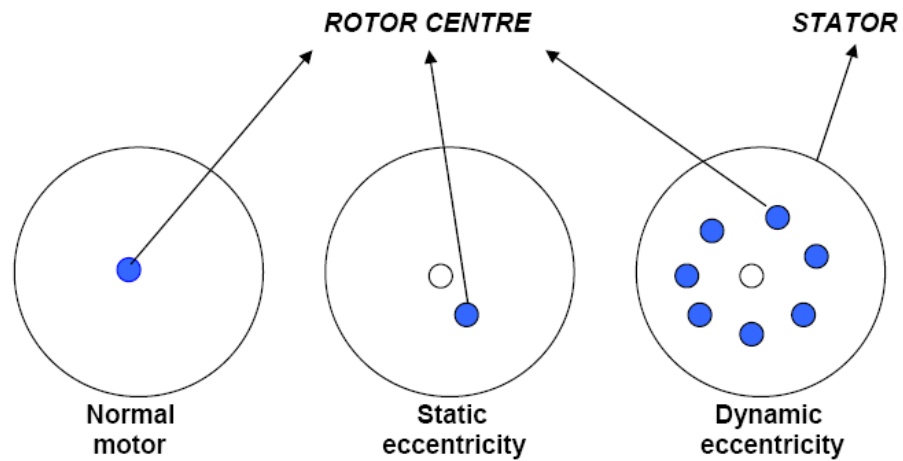


그림 5.8 전동기 회전자와 고정자의 정적 편심 및 동적 편심⁽⁴⁾

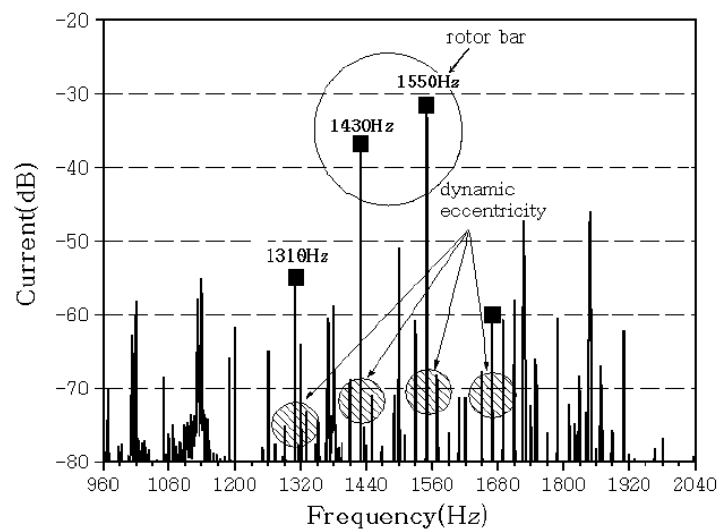
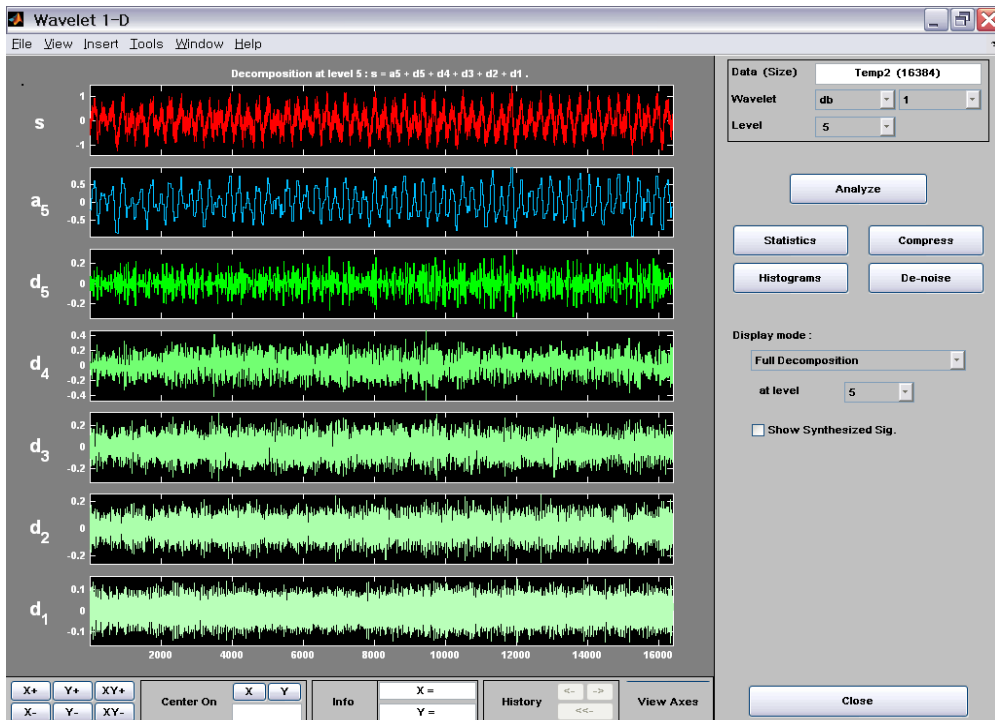


그림 5.9 복수펄프 구동용 전동기의 주파수별 전류스펙트럼

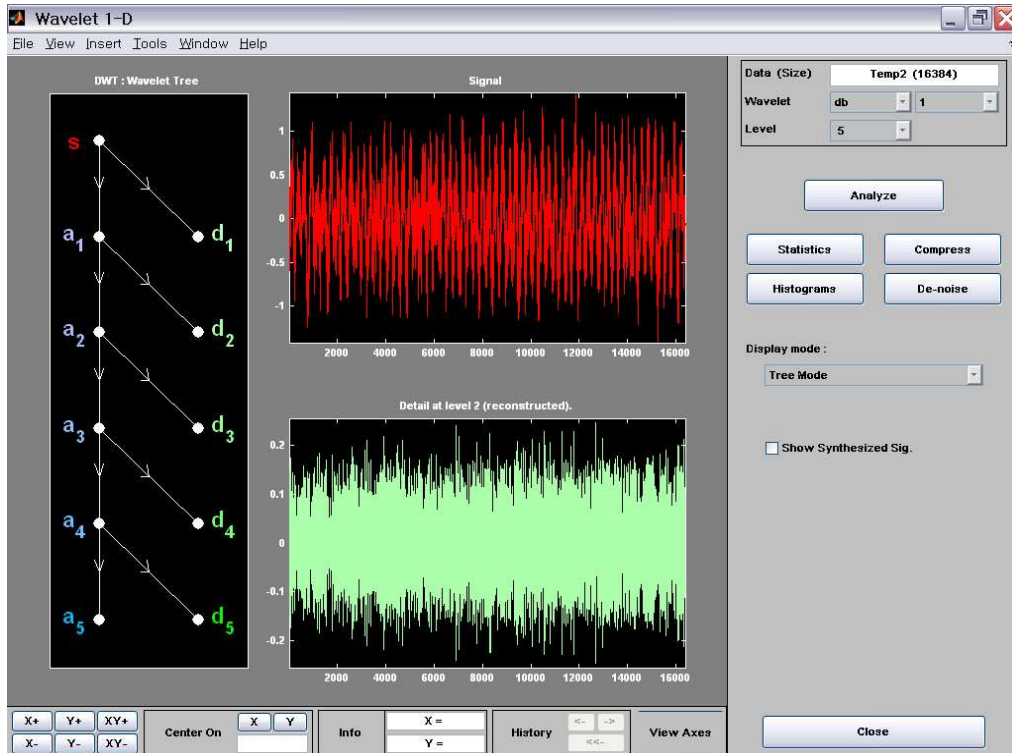
그림 5.9는 복수펌프 구동전동기의 1kHz 이후의 주요 진류 스펙트럼을 나타낸 그림으로 1430 Hz 주파수 좌우에 120Hz의 회전자 봉 측대파가 가장 크게 나타났으며 다른 주파수 범위도 많은 측대파가 나타나는 전형적인 동적 편심 현상이 보였다.

5.2.5 웨이블릿 변환에 의한 주파수 분석

회전자 봉의 동적 편심으로 소음을 유발하는 것으로 추정되는 1490Hz의 진동가속도 스펙트럼은 신호가 매우 작게 나타나 FFT에 의한 스펙트럼 분석만으로는 정확한 소음 및 진동진단이 어려웠다. 따라서 복수펌프 구동전동기의 가속도 진동을 웨이블릿 변환하여 각 주파수별 신호와 특정 주파수 대역별 신호를 5단계의 스펙트럼으로 나타나도록 하였다. 그림 5.10은 진동가속도 신호 데이터를 웨이블릿 변환하여 Daubechies 방법으로 분석한 각 주파수 별 스펙트럼 화면이다. 그림 5.10 (a)는 진동가속도 데이터를 웨이블릿 변환하여 wavelet 1-D로 처리 분석한 초기 웨이블릿 화면이고, (b)는 분석화면을 tree mode로 전환하여 분석한 화면이다.



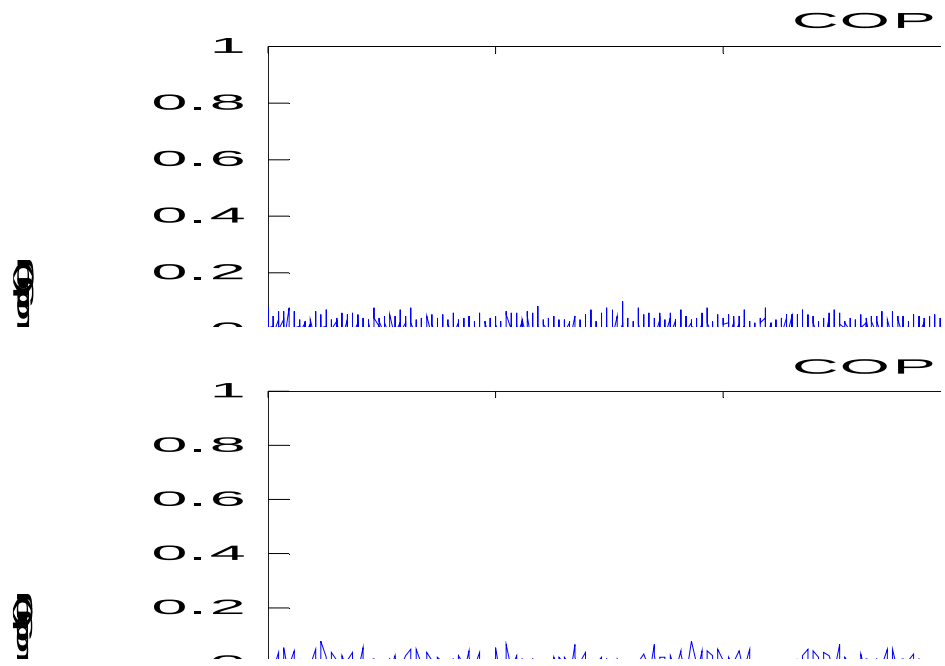
(a) 웨이블릿 변환 초기분석 화면(full decomposition)



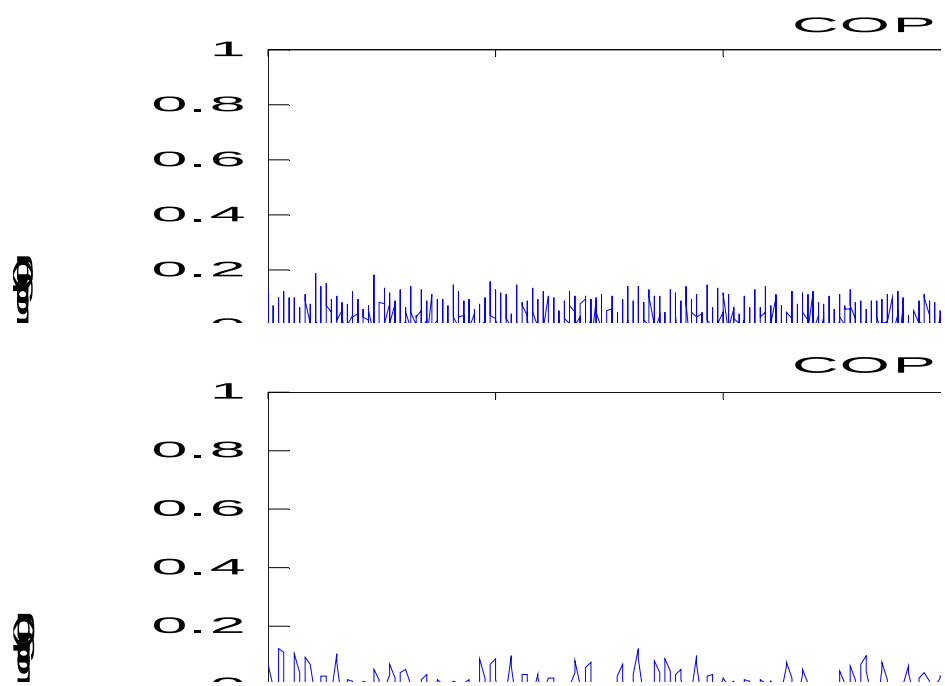
(b) Tree mode로 나타낸 웨이블릿 화면

그림 5.10 웨이블릿 변환된 각 주파수별 파형

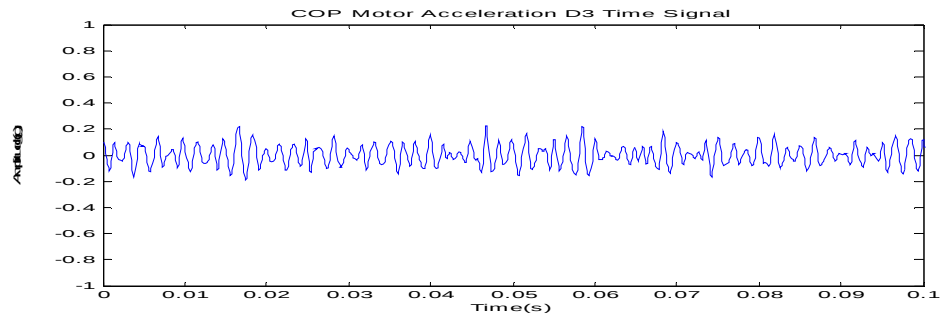
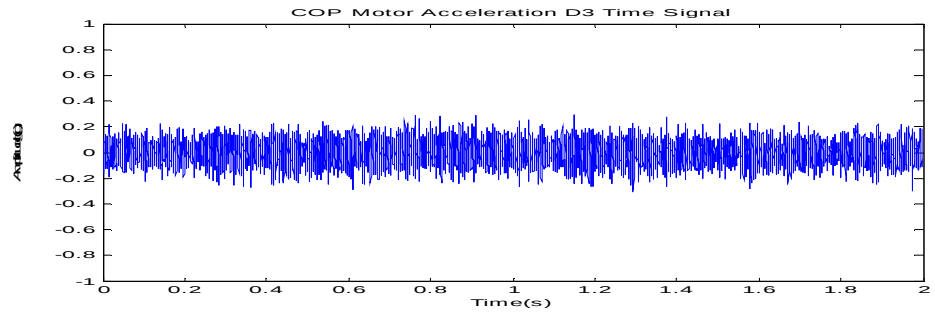
그림 5.11은 그림 5.10에서 보여지는 화면을 이해하기 쉽도록 각 단계별로 동일한 스케일로 분리, 확대하였으며 시간파형의 시간 스케일 간격도 2초와 0.1초 2가지로 나누어 비교 분석할 수 있도록 하였다. 시간에 대한 파형신호를 비교한 결과 d_2 와 d_4 레벨의 신호가 가장 큰 것으로 나타났고, 파형의 특징으로는 d_2 의 파형이 일정한 주기로 반복되는 맥동현상을 보여주고 있다.



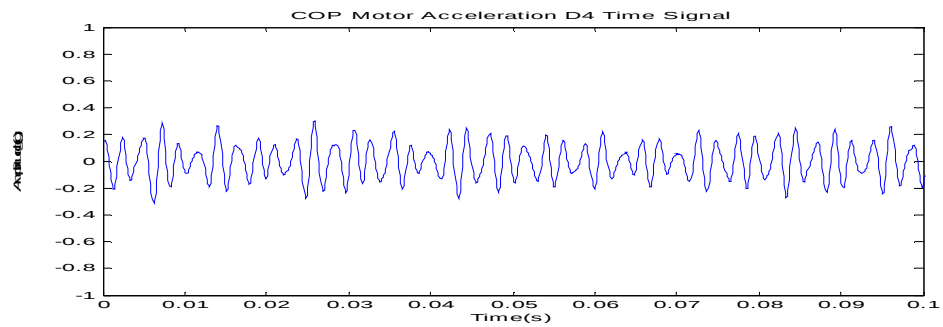
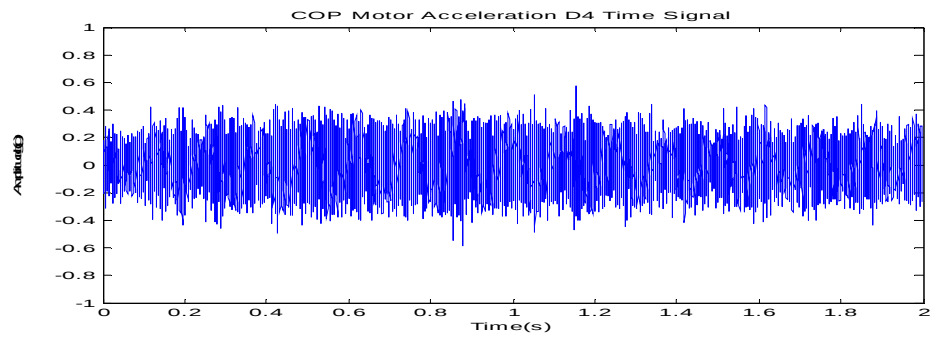
(a) Acceleration time signal of d1 level



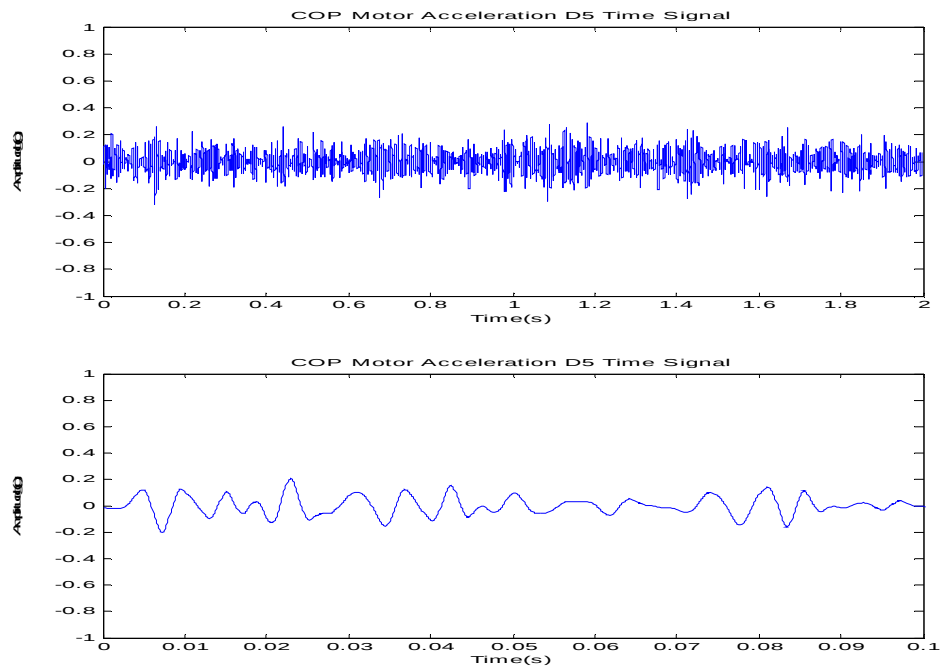
(b) Acceleration time signal of d2 level



(c) Acceleration time signal of d3 level



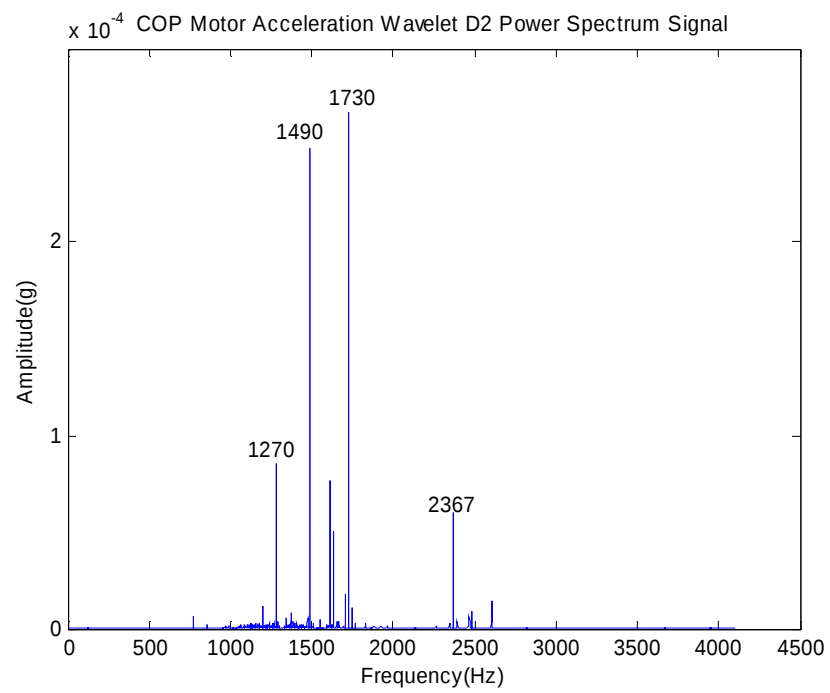
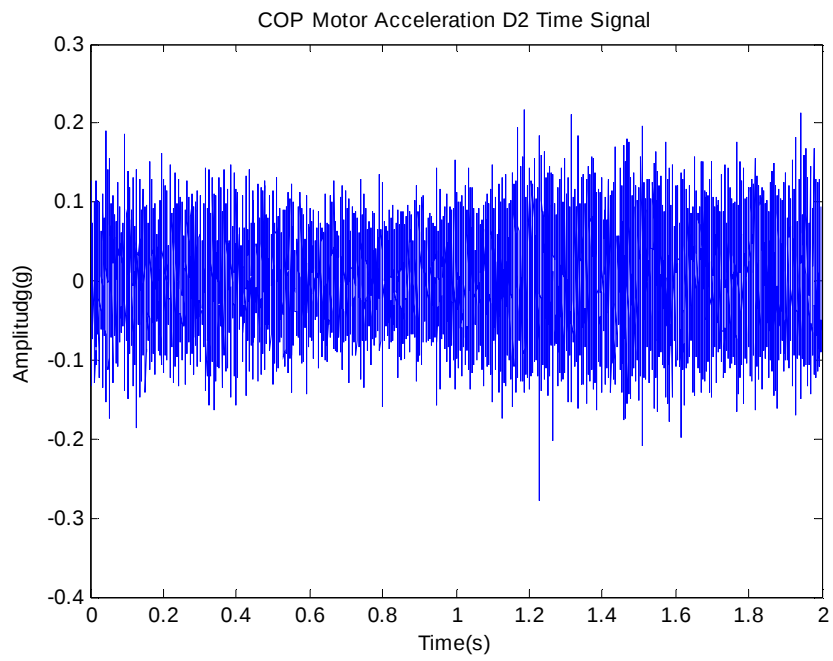
(d) Acceleration time signal of d4 level



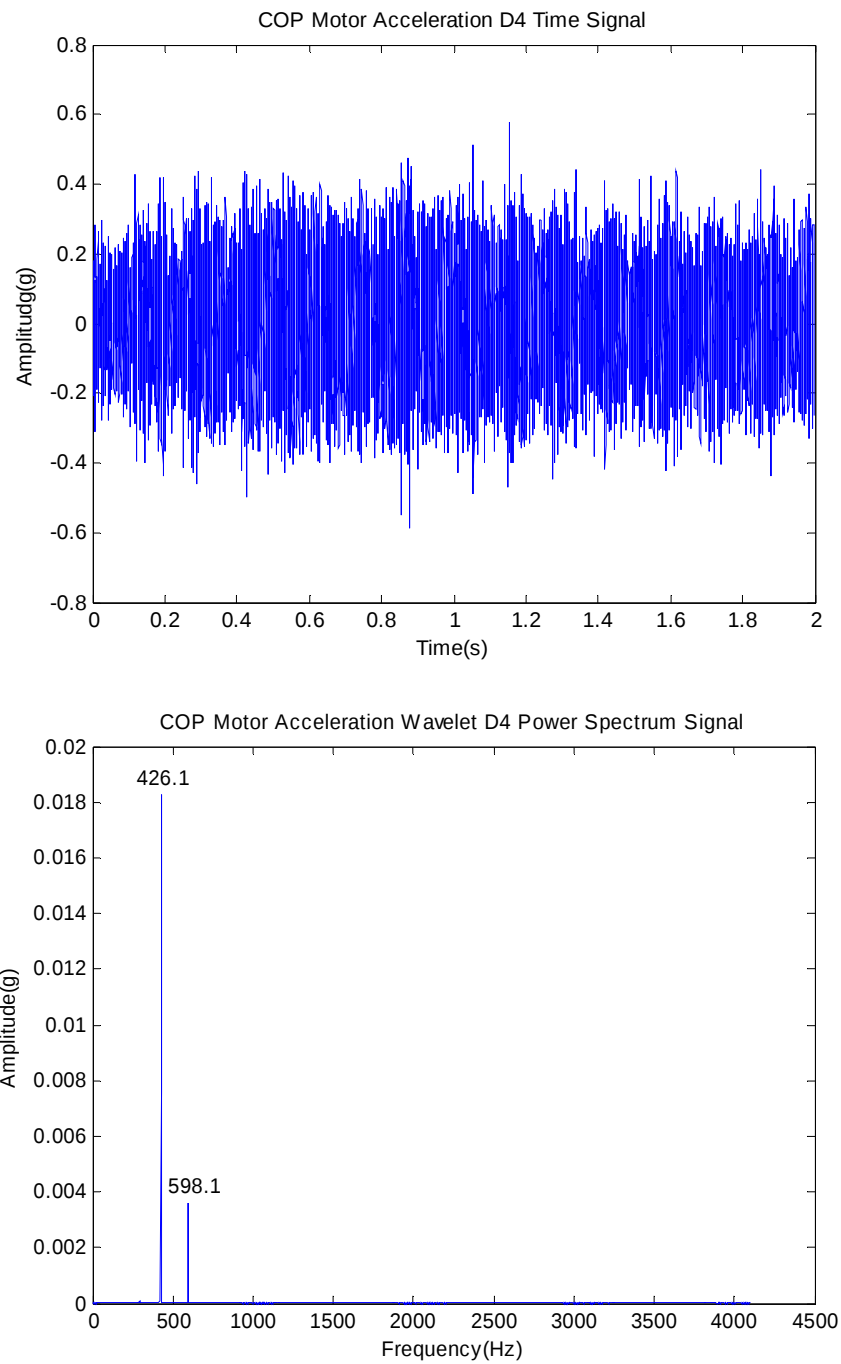
(e) Acceleration time signal of d5 level

그림 5.11 웨이블릿 변환된 시간-주파수별 스펙트럼

그림 5.12는 그림 5.11의 d2, d4 레벨의 시간파형과 웨이블릿 변환 후 Power Spectrum에 의한 주파수분석을 수행한 그림이다. 웨이블릿 변환 후 Power Spectrum 분석결과 진동가속도 FFT분석에서는 잘 나타나지 않았던 신호가 아주 잘 나타나는 것을 보여주고 있으며, d2레벨에서는 소음신호가 가장 높게 나타났던 1490Hz에서 120Hz의 측대파가 보여진다. 또한 d4 레벨에서도 426.1Hz와 598.1Hz 주파수의 스펙트럼 신호가 나타남을 알 수 있다.



(a) d2 레벨의 시간파형(위) 및 스펙트럼(아래)



(b) d4 레벨의 시간파형(위) 및 스펙트럼(아래)

그림 5.12 웨이블릿 변환 후의 Power Spectrum 및 시간파형

6. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소 2차 계통 설비 중 대형 유도전동기로 운전되고 있는 복수펌프 구동용 전동기를 기존의 이상상태 진단기법인 진동신호와 입력전류 신호 분석법에 더하여 소음측정과 근래에 활발히 연구되고 있는 새로운 신호처리기법인 웨이블렛변환 주파수분석법을 적용하였다. 신호분석 결과, 진동속도 및 가속도에서는 거의 나타나지 않았던 신호가 소음신호 분석결과 1,490Hz와 이것의 2배수인 2,980Hz 주파수대역의 소음이 전동기 전체의 주 소음원임을 알 수 있었다. 이에 대한 입력전류 분석결과 회전자 봉의 상태변화 및 전동기의 동적 편심에 의해 유발될 수 있는 회전자 봉 통과 주파수 및 측대파가 전체 소음을 주도하는 것임을 알 수 있었다. 또한 주 소음을 유발하는 주파수대의 스펙트럼이 진동속도 및 가속도에서는 아주 작거나 거의 나타나지 않았으나, 웨이블렛 변환 후 주파수 분석결과 동 주파수대에서의 스펙트럼 이상신호가 뚜렷이 나타남을 알 수 있었다. 따라서 대형 전동기의 이상상태 진단에 직접 기기에 접촉하지 않으면서도 쉽고 안전하게 측정할 수 있는 소음을 이용하여 기기의 이상유무를 우선 확인한 후에 일정한 기준치를 초과하는 이상 소음이 발생하는 기기에 대해서는 일반적인 진동신호 분석기법 외에 입력전류분석 및 웨이블렛변환 주파수분석 기법을 이용하여 보다 정확한 설비이상 진단 및 예측이 가능함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) C. Sidney Burrus, Ramesh A. Gopmath and Haittao Guo , 1998, Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms
- (2) Elin Johansson, 2005.10, Wavelet Theory and some of its Application
- (3) Rao, S. S., 1995, Mechanical Vibrations with Disk (3rd Edition), Addison-Wesley, New York.
- (4) Aditya Korde B.E.(Elec.), On-line Condition Monitoring of Motors Using Electrical Signature Analysis
- (5) EPRI Technical Report 1000968, 2000.12, Troubleshooting of Electric Motors
- (6) Zhongming Ye, Bin Wu, Alireza Sadeghian, 2003.9, Current Signature Analysis of Induction Motor Mechanical Faults by Wavelet Packet Decomposition
- (7) Wesley G.Zanardelli, Elias G, Strangas, Selin Aviyente, Failure Prognosis For Permanent Magnet AC drives Based on Wavelet Analysis
- (8) Wesley G. Zanardelli, Elias G, Strangas, Hassan K. Khalil, John M. Miller, 2003.10. Wavelet-Based Methods for The Prognosis of Mechanical and Electrical Failures in Electric Motors
- (9) W.-X.Yang, X.-M.Ren, 2003.10, Detecting Impulses in Mechanical Signal by Wavelets
- (10) Ming Xu, Tom Alford, 1998, Motor Current Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis
- (11) G.K. Singh, Sa'Ad Ahmed Saleh Al Kazzaz, 2002. 8, Induction Machine Drive Condition Monitoring And Diagnostic Research-A Survey
- (12) V. G. Manohar, Prabhat Kumar, 2003, An International Journal of Nuclear Power-Vol. 17 No.1~3, Comprehensive Predictive Maintenance of Electrical Motors in Indian Nuclear Power Plants
- (13) Mohamed El Hachemi Benbouzid, 2000. 10, A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection
- (14) Daniel J. Inman 저, 이건복, 임병덕, 정태건, 황재혁 공역, 2002, 최신기계진동학, Prentice Hall.
- (15) 양보석, 김광진, 한천, 2004, 진동 및 전류신호의 데이터융합을 이용한 유도전동기의 결함진단, 한국소음진동공학회 논문집 제14권 제11호, pp. 1091-1100

- (16) 양보석, 임동수, 김병욱, 1999, Wavelet 변환을 이용한 구름요소베어링의 결함검출, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 249-253
- (17) 안경룡, 2002, 인공신경망을 이용한 회전기계의 고장진단, 부경대학교 박사학위논문, pp. 15-23
- (18) 양보석, 1998, 기계건강진단 사례집, 효성출판사
- (19) 양보석, 2002, 회전기계의 진동, 도서출판 인터비전
- (20) 한국전력공사, 1995.7, 회전기계의 진동진단 기술(I)

감사의 글

먼저 본 논문이 완성되기까지 지난 2년 동안 여러 가지로 부족한 저를 받아 지도해 주시고 인격적으로도 깊이 헤아려 주신 김동조 지도교수님께 깊이 감사드립니다. 그리고 바쁘신 연구 활동 중에서도 본 논문이 완성되기까지 세심하게 심사, 지도하여 주심은 물론 연구실에서 공부하는 데 항상 관심과 애정을 표현하여 주신 양보석 교수님께도 존경과 감사의 말씀을 드립니다. 또한 늦은 나이에 다시 학업을 할 수 있도록 이끌어 주시고 격려하여 주셨을 뿐만 아니라 여러 가지로 바쁘신 중에서도 부족한 논문을 지도, 심사하여 주신 한국수력원자력(주)의 이우방 박사님, 그리고 사모님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

만학도로서 부족한 점이 많음에도 불구하고 널리 이해하시고 학문적 조언과 학교생활에 잘 적응할 수 있도록 도와주신 김형자 교수님, 이수종 교수님께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

밤낮으로 연구실에서 학문에 몰두하면서 많은 도움을 준 박사과정의 하종룡 군, 그리고 본 논문 작성에 여러 가지로 많은 도움을 준 석사과정의 손종덕 군, 항상 밝은 빛으로 맞아주는 이재갑 군, 심민찬 군, 김선화 군, 저와 같은 만학도의 부족하고 어려운 점을 이해하고 조언해 주신 공영모 박사님, 기타 연구실의 여러분께도 감사의 말씀을 드립니다.

끝으로 언제나 나의 곁에서 의지가 되어준 사랑하는 아내 혜영과 두 아들 수환, 수명 그리고 멀리에서 항상 자식걱정에 노심초사하시는 연노하신 아버지, 어머니께 감사의 말씀과 함께 이 논문을 바치고자 합니다.

2005년 12월

채순석 올림