

처플렛을 이용한 회전체 오더 분석 알고리즘 개발

Development of Order Tracking Algorithm using Chirplet Transform

손석만* · 이준신* · 이상국* · 이욱륜* · 이선기*

Sohn SeokMan, Lee JunShin, LeeSangKuk, LeeWookRyun, Lee SunKi

Key Words : Order Tracking, Rotor Dynamics, Chirplet, Time-Frequency Analysis

ABSTRACT

The condition monitoring of rotating machinery such as turbines, pumps and compressors, determine what repairs are needed to avoid shutdown and disassembly of the machine in an industrial plant. Many diagnosis methods have been developed for use when the machine is running at steady state, the stationary condition. But much information can be gained about a rotor's condition during non-stationary conditions such as run-up and run-down. Order tracking analysis is a powerful tool for analyzing the condition of a rotating machine when its speed changes over time. Powerful OTA using digital signal processing has some advantages(cheap hardware, the powerful methods, the accurate post processing) and also some disadvantages(calculation time, high speed sampling). New OTA tool based on the chirplet transform is similar to the short time Fourier transform. But, it has good resolution at high speed like other OTA methods based STFT and more resolution for constant frequency components than re-sampling OTA..

기 호 설 명

t_c : 변환의 중심 시간, f_c : 오더 분석의 기본 주파수,
 c : chirp rate, $s(t)$: 진동 신호, $g(t)$: basis function

1. 서 론

발전소에서 많이 사용되는 펌프, 압축기, 터빈과 같은 회전 기기에서 진동 신호 해석은 운전 상태에서와 기동/정지시와 같은 과도 상태에서도 이루어진다. 과도 상태에서의 진동 신호 해석은 크랙 진단, 오일 뿔, 위험 속도 판명등과 같은 회전 기기 진단에 있어서 많은 장점이 있다. 회전 주파수 배수의 함수로 신호의 위상과 크기를 나타내는 오더 분석은 회전체의 과도 상태시 기기의 속도와 무관하게 일정한 해석 line수를 유지시키면서 오더 분석을 시행하게 되어 정밀한 신호 분석을 수행할 수 있게 한다.

가장 많이 사용하고 있는 오더 분석 방법은

Re-sampling을 이용한 방법으로 이는 일정 시간에 따른 샘플링이 아닌 일정 회전각도에 따른 샘플링이다. 이 방법은 일반적으로 일정 시간에 따른 샘플링후 회전속도의 적분으로 회전각도를 구하고 일정 회전각도에 따른 진동신호를 얻기 위해 내삽(interpolation)을 통해 신호를 재처리한다. 이때, 많은 계산을 요구하게 되고 내삽에 따라 필연적으로 오차가 발생하게 된다.

Chirplet은 비교적 최근에 정립된 신호처리 방법으로 전 절에서 설명한 바와 같이 기준 주파수가 일정하게 변하는 신호처리에서 매우 정밀한 값을 보여준다. 펌프 기동 정지시에는 매우 빠른 주파수 변화의 양상을 보이므로 본 방법을 사용하여 오더 분석에 적용하면 주파수 영역에 걸쳐 매우 정밀한 분해능을 보여준다.

2. 처플렛 변환

기본적으로 사용되는 처플렛 변환은 식(1)과 같으며 이외에도 많은 기본 함수를 가지고 있다. 또한 전 절에서 설명한 바와 같이 매우 많은 자유도를 가지고 있으며 이를 체계적으로 설명하기 위해 표 1과 같이 변환은 구성되며 이 변환은 기본식에서 다음 사항을 추가하는 것으로 완료된다.

$$g_{t_c, f_c, \log(\Delta t), c}(t) = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{\pi} \Delta t}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{\Delta t}\right)^2} e^{j2\pi [c(t-t_c)^2 + f_c(t-t_c)]} \quad (1)$$

† 한전 전력연구원
E-mail : bborng@kepri.re.kr
Tel : (042)865-5505, Fax : (042)865-5504

* 한전 전력연구원

표 1. 처플렛 변환에서 자유도

	변환 표시	신호 변환
Translation in Time	$= C_{tc,0,0,0,0} g(t)$	$= g(t - tc)$
Translation in Frequency	$= C_{0,fc,0,0,0} g(t)$	$= e^{j2\pi fc t} g(t)$
Dilation in Time	$= C_{0,0,\log(\Delta t),0,0} g$	$= \frac{1}{\sqrt{ \Delta t }} g\left(\frac{t}{\Delta t}\right)$
Dilation in Frequency		$= \sqrt{ \Delta f } g^*(t\Delta f)$
Shear in Frequency	$= C_{0,0,0,c,0} g(t)$	$= e^{j2\pi \frac{c}{2} t^2} g(t)$
Shear in Time	$= C_{0,0,0,0,d} g(t)$	$= e^{j2\pi \frac{d}{2} t^2} * g(t)$
Perspective in Frequency		$= \langle g\left(\frac{at + \tau}{pt + 1}\right) s(t) \rangle$
Perspective in Time		$= \langle g\left(\frac{at + f}{rt + 1}\right) s(t) \rangle$

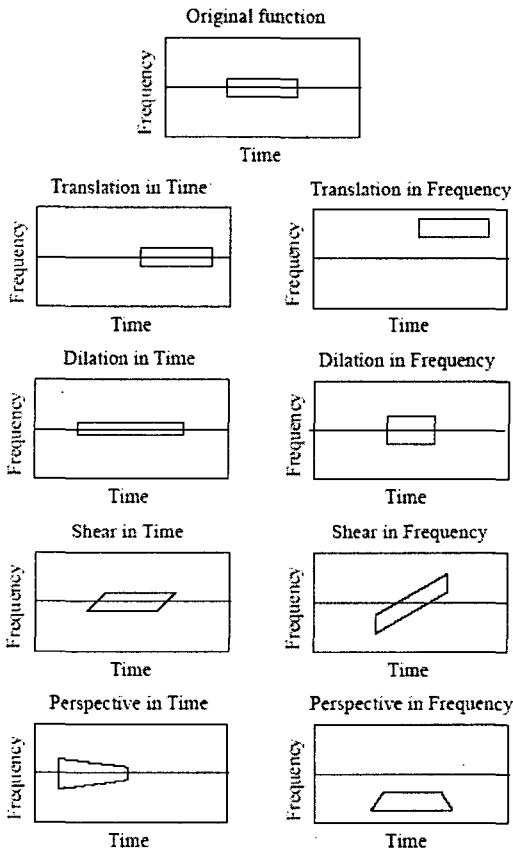


그림 1. 시간-주파수 영역에서 각종 처플렛 변환

표 1과 같이 변환에 많은 자유도를 가지고 있으며 각 자유도에 따른 처플렛 변환은 그림 (2)와 같이 시간-주파수 영역에서 더욱 쉽게 설명이 된다.

과도 상태 신호 분석에 많이 쓰이는 Short time 푸리에 변환은 다음과 같이 처플렛 변환을 사용하여 재구성 할 수 있다.

$$C_{tc,fc,0,0,0} g(t) = \langle g_{tc,fc,\log(\Delta t)} | s(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} g^*(t) s(t) dt \quad (2)$$

여기서 $g^*(t)$ 는 $g(t)$ 의 complex conjugate를 뜻한다.

3. 회전체 오더 분석 알고리즘 개발

처플렛을 오더 분석에 사용하기 위해서는 변환의 자유도를 몇 개 제한해야 한다. 처플렛 변환에서 사용하는 자유도는 주파수 이동(frequency translation)과 주파수 전단(frequency shear)으로만 제한하고 기존 윈도우 함수를 사용할 수 있도록 식(2)를 조정하면 다음과 같이 된다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} window(n) \cdot x(n) \cdot e^{j\pi\left(\frac{\alpha}{2}n^2 + fc n\right)k} \quad (3)$$

여기서, 그림 2와 같이 α 와 β 는 각각 chirp rate와 초기 주파수를 나타낸다.

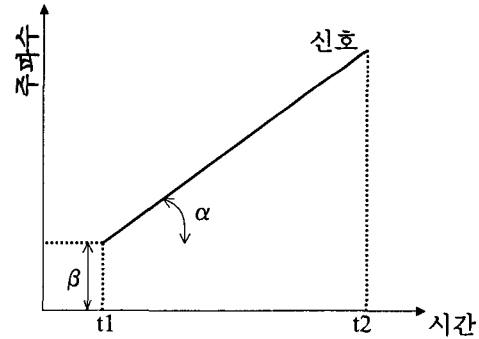


그림 2. 시간-주파수 영역에서 오더 분석을 위한 처플렛 변환 방법

일반적으로 기동 정지 신호에서 회전속도는 시간에 비례하여 증가하거나 감소하지만 식의 일반화를 위해서 적응(adaptive) 개념을 도입하며 일정구간씩 해석하는 short time 푸리에 변환의 개념을 도입해야 한다. 위의 개념을 도입하여 최종식을 도출하면 식(3)과 같다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} window(n) \cdot x(n) \cdot e^{j\pi\left(\frac{\alpha}{2}\left(\frac{n}{f_s}\right)^2 + \beta \frac{n}{f_s}\right) \frac{k\Delta\omega}{N}} \quad (4)$$

여기서, $\alpha = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$, $\beta = \omega_1$ 이고 ω_1 은 t_1 에서의 회전속

도, ω_2 는 t2에서의 회전속도를 각각 나타낸다.

4. 결과

4.1 가상 신호를 이용한 개발된 오더 분석의 알고리즘 비교

본 장에서는 가상 신호를 발생시켜 각각 오더 분석의 알고리즘을 비교하였다. 가상 신호는 오더를 나타내는 3개의 회전속도에 비례하는 주파수 성분과 고유진동수를 나타내는 1개의 일정한 주파수 성분으로 구성되어 있으며 식 (5)로 해석적으로 나타낸다. 본 신호는 $x = y + j \cdot z$ 로 y축방향 성분을 실수로 z축 방향 성분을 허수로 할당된 복소수 x에 대해 위에서 소개한 오더 분석을 기존 방식과 비교할 예정이다.

$$\begin{aligned} p(t) = & \exp(-j\pi/9)\exp[j(a_1t^{5/2} + b_1t)] + 0.5\exp(-j2\pi/9)\exp[-j(a_2t^{5/2} + b_2t)] \\ & + 0.3\exp(j\pi/6)\exp[j(a_2t^{5/2} + b_2t)] + \exp(j\pi/12)\exp[-j(a_2t^{5/2} + b_2t)] \\ & + 0.3\exp(j\pi/6)\exp[j(a_3t^{5/2} + b_3t)] + \exp(j\pi/12)\exp[-j(a_3t^{5/2} + b_3t)] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $a_1 = 6.22\pi s^{-5/2}$, $a_2 = 12.44\pi s^{-5/2}$, $a_3 = 24.88\pi s^{-5/2}$, $b_1 = 6\pi s^{-1}$, $b_2 = 12\pi s^{-1}$, $b_3 = 24\pi s^{-1}$ 이고 기준이 되는 주파수는 $\omega_1 = 5/2a_1t^{3/2} + b_1$, $i = 1, 2, 3$ 와 $\omega_4 = 100\pi$ 로 회전 주파수는 ω_2 로 설정한다.

본 식을 이용한 가상 신호는 512Hz 샘플링으로 회전속도는 100RPM에서 1800RPM으로, 기동 시간은 9초로 하여 펌프 기동과 동일 조건이 되도록 수행하였다. 그리고, 올바른 비교를 위하여 위도우는 모두 해닝(hanning) 윈도우를 사용하였다.

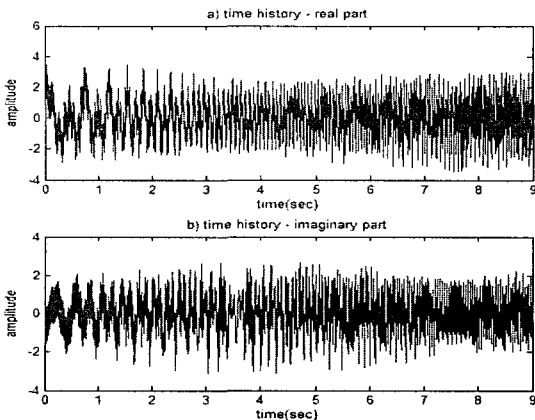


그림 3. 가상 신호 파일

본 신호를 short time 푸리에 변환에 적용하면 그림 3과 같은 결과를 얻게 되지만 실제 진단에 필요한 보테 선도나 나이퀴스트 선도는 오더 분석을 통해 이루어지므로 정확한 오더 분석을 수행하지 않으면 정밀한 펌프 진단을 할 수 없다.

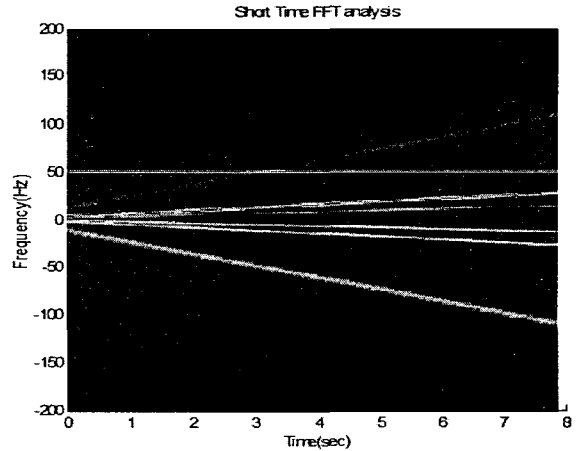


그림 4 Short Time FFT를 이용한 신호 분석

위 그림에서 보이듯이 회전속도에 비례하는 (+)(-)주파수를 가진 3개 주파수 성분과 일정한 주파수를 가지는 성분이 같이 보이고 있음을 알 수 있다. 본 신호를 이용해서 기존의 오더 분석 기법인 Re-sampling을 이용하면 그림 4와 같이 나타낸다.

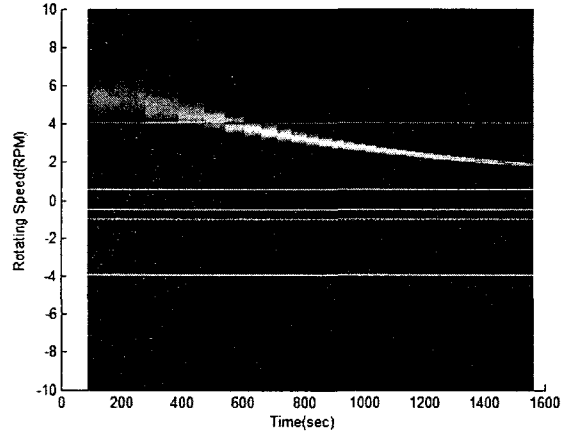


그림 5. 기준 신호에 대한 Re-sampling 오더 분석

기존의 Re-sampling에서는 매우 깨끗한 시간-주파수 표현을 얻을 수 있으며, 회전속도와 같이 변하는 성분에 대해서는 매우 좋은 해상도를 보이지만 같이 변하지 않는 성분에 대해서는 해상도가 매우 많이 떨어짐을 알 수 있다. 이는 회전속도에 따라 샘플링을 다시 하기 때문이다. 따라서, 정밀한 위험 속도 판명에 영향을 미치게 된다.

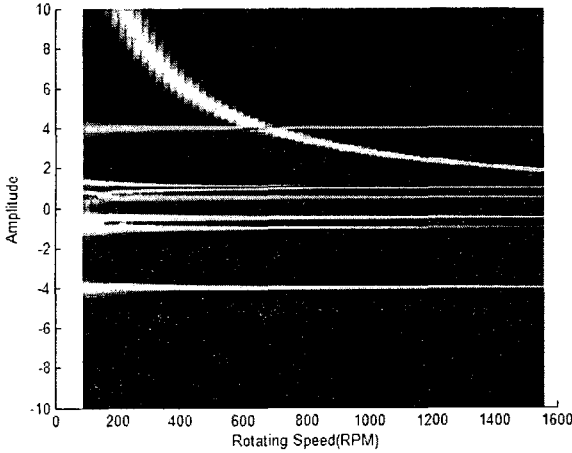


그림 6. Chirplet 변환

개발한 Chirplet을 이용한 오더 분석은 기존의 계산을 크게 증가시키지 않고 매우 정밀한 해석을 할 수 있다. 위 그림에서 보는 바와 같이 회전속도에 비례하는 성분과 상관없는 주파수 성분 모두 일정 이상의 주파수 해상력을 가지고 있음을 보여주며 회전 속도가 높으면 매우 정밀한 오더 해상도를 보여준다. 시간축 기준으로 오더 분석하는 방법들의 공통점인 회전 속도가 낮을 경우 해상도가 떨어지지만 Chirp Z 변환에 비해서는 해상도가 높다. 또한, Chirp Z 변환과는 달리 고차 오더에서도 저차와 같은 해상도를 가지고 있어 매우 정밀한 분석에 유용하다.

3.2 실제 펌프에서의 신호 결과

본 신호는 원자력발전소 condensate service 펌프를 대상으로 케이싱 진동을 측정하였다. 본 펌프는 원심 일단형 수평 펌프로 용량은 7.5kw이고 운전 회전속도는 1800rpm이다. (그림 7 참조)

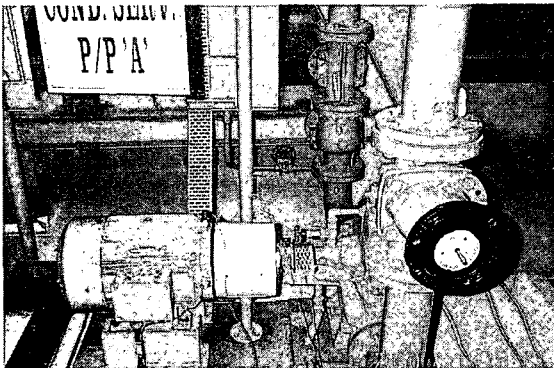


그림 7. 측정 대상 펌프

본 펌프는 발전소에서 작은 용량의 펌프로써 기동 정지 시간이 10여초 정도로 매우 짧다. 따라서, 기동/정지시의 진동 신호 분석은 매우 어려우며 그림 8과 같이 spectrogram과 같은 기존의 short time FFT 분석으로는 일정 이상의 주파수 해상도를 가지는 것은 불가능 하다.

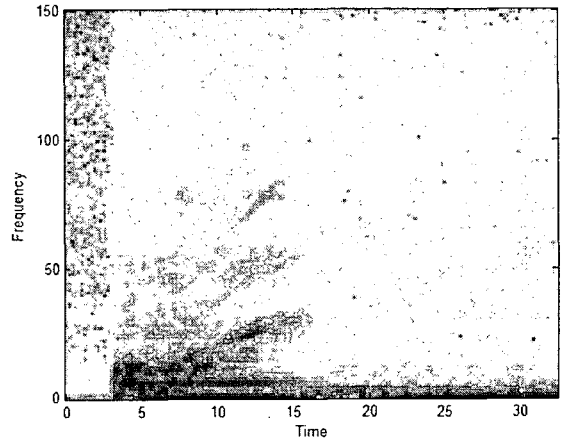


그림 8. 펌프 기동시의 spectrogram

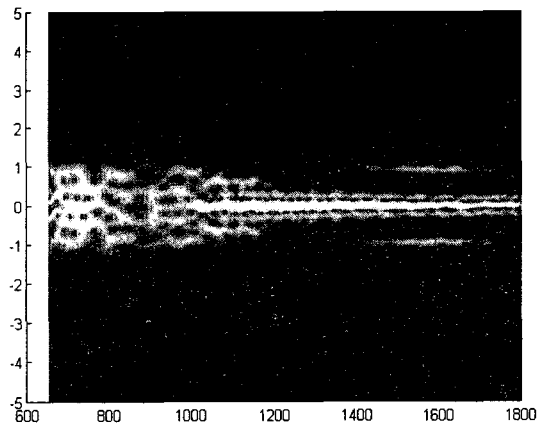


그림 9. 처플렛을 이용한 오더 분석

두 그래프다 1X, 2X, 3X가 확연히 구분되는 모습을 보인다. 하지만, 낮은 회전영역에서는 약간씩 오더가 올라가 있는데 이것은 정확한 타고 신호가 없어 spectrogram을 통한 속도 이력을 생성하는데 있어서 낮은 회전수에서는 spectrogram 자체 1X 성분의 구별이 힘들어 나름대로 추정 한 지배 주파수가 실제 회전수와 차이에서 발생하는 것으로 사료된다.

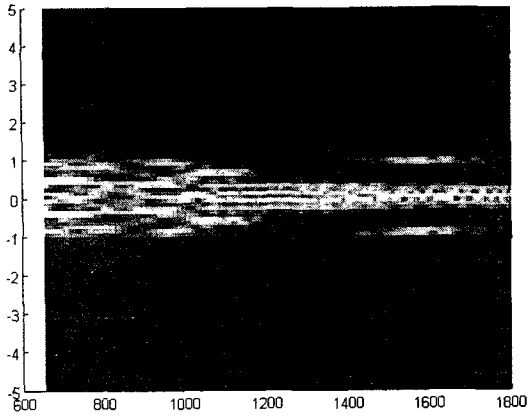


그림 10. 재 샘플링을 통한 오더 분석

본 펌프 진동 분석에서는 오더 해상도가 0.02일 때 최대한의 해상도를 보이는 재 샘플링 기법을 통한 오더 해석은 어느 정도 1X, 2X, 3X의 식별이 가능하지만 해상도가 본 논문에서 제시한 방법에 비해서는 매우 떨어지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

저플렛(Chirplet) 변환에서 중심 주파수 이동, 시간축 이동, 주파수축 회전의 변환을 적용하여 개발한 오더 분석은 재 샘플링에 비해 빠르며 뛰어난 정밀도를 지닌다. 저 회전 속도에서는 재 샘플링에 비해 떨어지는 해상도를 가지지만 일반적으로 관심이 있는 1000RPM 이상에서는 매우 뛰어난 해상도를 지닌다.

본 두가지 방법에 대해 방향성 주파수 분석 알고리즘을 적용하여 분석하였으며 실제 펌프 신호 처리에 있어서 정밀도, 계산속도, 신호 식별 여부 면에서 매우 뛰어남이 보였다.

참 고 문 헌

(1) L. Rabiner and B. Gold, 1975, Theory and Application of Digital Signal Processing, Prentice-Hall International
 (2) R. Potter and M. Gribler, Computed order tracking

obsoletes older methods, 1989, Proceedings of the Society of Automotive Engineers, SAE paper no. 891131

(3) Hewlett Packard, 1994, Effective Machinery Measurements using Dynamic Signal Analyzers, Application Note 243-1

(4) K. R. Fyfe and E. D. S. Munck, 1997, Analysis of Computed Order Tracking, J. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 11, no. 2, pp187-205

(5) M. Bai and J. Huang and M. Hong and F. Su, 2003, Fault diagnosis of rotating machinery using an intelligent order tracking system, Journal of Sound and Vibration

(6) H. Vold and J. Leuridan, 1993, High resolution order tracking at extreme slow rates, using Kalman tracking filters, Proceedings of the SAE Noise and Vibration Conference, SAE paper no. 931288

(7) H. Vold and M. Mains and J.R. Blough, 1997, Theoretical foundations for high performance order tracking with the Vold Kalman filter, Proceedings of Society of Automotive Engineers, SAE paper number 972007

(8) National Instruments Corporation, 2001, Order Analysis Toolset for LabVIEW User Manual, Part Number 322879A-01

(9) J. R. Blough, 2003, Development and Analysis of Time Variant Discrete Fourier Transform Order Tracking, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 17, no. 6, pp 1185-1199

(10) YunSik Han and ChongWon Lee, 1999, Directional Wigner Distribution for Order Analysis in Rotating/Reciprocating Machines, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 13, no. 5, pp 723-737

(11) Steave Mann and Simon Haykin, 1995, The Chirplet Transform: Physical Considerations, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 43, no. 11, pp2745-2761

(12) Steave Mann and Simon Haykin, 1991, The Chirplet Transform: A generalization of Gabor's logon transform, Vision Interface 1991