

국부평균분해에 기초한 진동신호의 잡음제거방법

조명진, 리금성

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학기술부문에서는 해당 과학기술문제해결에서 제일 걸린 문제, 가장 큰 실리를 보장할수 있는 문제를 종자로 선택하고 하나하나 풀어나가야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제20권 381페이지)

우리는 인민경제 여러 부문에서 리용되는 회전기계들의 정상적인 운영을 보장하는데서 절실하게 제기되는 회전기계의 진동진단전문가체계개발의 첫 공정인 진동신호의 잡음제거를 새로운 신호처리리론인 국부평균분해에 의하여 진행하는 한가지 방법을 제기하였다.

전통적인 신호잡음제거방법에는 FIR, IIR와 같은 러파기에 의한 방법, 푸리에변환에 기초한 방법, 경험모드분해에 기초한 방법[2], 웨블레트분해에 기초한 방법[3], 성김분해리론에 기초한 방법[1] 등이 있다.

론문에서는 신호의 적응특성이 좋은 새로운 신호분해방법인 국부평균분해방법에 기초한 진동신호의 잡음제거방법을 제기하고 이 방법의 효과성을 모의자료와 현장측정자료를 리용하여 EMD방법에 의한 잡음제거효과와 대비검증하였다.

1. 국부평균분해방법

국부평균분해(Local Mean Decomposition-LMD)방법은 새로운 자체적응적인 시간-주파수분석방법으로서 임의의 복잡한 신호를 포락선신호와 순수한 주파수변조신호의 적으로 표시되는 적함수(PF-product function)들로 분해한다. LMD방법은 시간영역에서의 신호분해방법으로서 최근에 많이 리용되는 경험모드분해(EMD)방법이 가지고있는 결함들을 극복하고 더 좋은 효능을 발휘하는 비정상신호처리방법이다.

EMD방법은 분해속도가 느리고 끝점근방에서의 분해효과가 높지 못한것으로 하여 신호의 실시간적인 처리를 요구하는 진동진단전문가체계의 실시간처리알고리즘으로 리용되는데 일정한 난점을 가지고있다. 그러나 LMD방법은 수렴속도가 높은것으로 하여 신호분해시간이 짧고 끝점처리효과가 좋은것으로 하여 EMD방법이 가지고있던 이러한 결함들을 극복함으로써 진동신호처리에서 널리 쓰일수 있다.

국부평균분해방법을 리용하여 신호 $x(t)$ 를 결과함수들로 분해하는 알고리즘은 다음과 같다.[4]

걸음 1 분해하려는 신호 $x(t)$ 의 모든 국부극점 n_i 들을 찾고 련이은 극점들의 평균값 m_i 를 계산한다.

$$m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \quad (1)$$

다음 이 평균값점들을 직선보간방법으로 연결하고 이동평균방법을 리용하여 평활처리를 진행하면 국부평균함수 $m_{11}(t)$ 를 얻는다.

걸음 2 대응하는 포락선평가량 a_i 를 다음의 식을 리용하여 계산한다.

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2} \quad (2)$$

포락선평가량 a_i 들을 걸음 1과 마찬가지로 방법으로 직선보간 및 평활처리하여 대응하는 포락선함수 $a_{11}(t)$ 를 얻는다.

걸음 3 신호 $x(t)$ 에서 국부평균신호 $m_{11}(t)$ 를 덜어 나머지신호 $h_{11}(t)$ 를 얻는다.

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \quad (3)$$

걸음 4 $h_{11}(t)$ 를 포락선함수 $a_{11}(t)$ 로 나눈다.

$$s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} \quad (4)$$

걸음 5 $s_{11}(t)$ 의 포락선함수 $a_{12}(t)$ 가 $a_{12}(t)=1$ 을 만족시키는 순수 주파수변조신호 $s_{11}(t)$ 가 얻어졌으면 $s_{11}(t)$ 를 첫 주파수변조신호로 취한다.

$a_{12}(t) \neq 1$ 이면 $s_{11}(t)$ 를 원신호로 하여 $s_{1n}(t)$ 가 순수 주파수변조신호로 될 때까지 즉 $s_{1n}(t)$ 의 포락선함수 $a_{1(n+1)}(t)$ 가 $a_{1(n+1)}(t)=1$ 을 만족할 때까지 걸음 1~걸음 4를 반복한다.

$$\begin{cases} h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \\ h_{12}(t) = s_{11}(t) - m_{12}(t) \\ \vdots \\ h_{1n}(t) = s_{1(n-1)}(t) - m_{1n}(t) \end{cases} \quad (5)$$

여기서

$$\begin{cases} s_{11}(t) = h_{11}(t) / a_{11}(t) \\ s_{12}(t) = h_{12}(t) / a_{12}(t) \\ \vdots \\ s_{1n}(t) = h_{1n}(t) / a_{1n}(t) \end{cases} \quad (6)$$

이 계산을 반복하면

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_{1n} = 1 \quad (7)$$

로 되는데 실제적으로 $1 - \delta \leq a_{1(n+1)} \leq 1 + \delta$ 의 조건을 만족하면 반복계산을 중지한다.

걸음 6 포락선평가함수 $a_{li}(t)$ 들을 곱하여 순간진폭함수 $a_1(t)$ 를 얻는다.

$$a_1(t) = a_{11}(t)a_{12}(t) \cdots a_{1n}(t) = \prod_{i=1}^n a_{li}(t) \quad (8)$$

걸음 7 순간진폭함수 $a_1(t)$ 에 순수 주파수변조신호 $s_{1n}(t)$ 를 곱해서 신호 $x(t)$ 의 첫번째 결과함수 PF_1 을 얻는다.

$$PF_1 = a_1(t)s_{1n}(t) \quad (9)$$

이때 PF_1 의 순간주파수는 $s_{1n}(t)$ 에 의하여 다음의 식으로 계산된다.

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\arccos(s_{1n}(t))]}{dt} \quad (10)$$

걸음 8 신호 $x(t)$ 에서 첫 결과함수 PF_1 을 덜어 새로운 신호 $u_1(t)$ 를 얻는다. $u_1(t)$ 를

원신호로 하여 결음 1~결음 7을 반복한다. 이 과정을 $u_k(t)$ 가 단조함수가 될 때까지 반복한다. 즉

$$\begin{cases} u_1(t) = x(t) - PF_1(t) \\ u_2(t) = u_1(t) - PF_2(t) \\ \vdots \\ u_k(t) = u_{k-1}(t) - PF_k(t) \end{cases} \quad (11)$$

이로부터 신호 $x(t)$ 는 다음과 같이 분해된다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^k PF_i(t) + u_k(t) \quad (12)$$

수치 모의 자료를 LMD방법으로 분해하자.

$$x(t) = \left[1 + 0.5 \cos\left(\frac{\pi t}{100}\right) \right] \cos\left(\frac{\pi t}{2} + 2 \cos\frac{\pi t}{50}\right) + \sin\left(\frac{\pi t}{2500}\right) \sin\left(\frac{6\pi t}{50}\right) \quad (13)$$

($t = 0, 1, 2, \dots, 600$)

EMD방법과 LMD방법으로 신호를 분해한 결과들을 원신호와 대비해보았을 때 EMD 분해결과로 얻어진 2번째 IMF는 외곡된 신호라는 것을 알 수 있다. 그러나 LMD분해에 의해서는 이러한 결함을 극복하고 정확한 신호를 분리해냈다. 처리시간을 대비하여보면 EMD방법으로서는 0.243s, LMD방법으로서는 0.038s로서 처리속도는 대략 6.4배 더 빠르다는 것을 알 수 있다.

2. 잡음제거알고리즘

회전기계들의 상태검사를 위한 가장 중요한 지표는 설비의 진동자료이다. 진동측정과정에 수감부설치상태와 작업환경 등의 원인에 의하여 신호에는 일반적으로 잡음이 포함되게 된다. 따라서 측정된 진동신호를 분석하기에 앞서 측정신호속에 섞인 잡음을 제거하여야 한다.

일반적으로 잡음의 에너지는 신호의 에너지에 비하여 매우 작으며 신호에 섞인 잡음은 고주파형태로 존재한다. 한편 신호속에 포함된 고주파성분들은 LMD방법에 의하여 먼저 분해되게 된다. 그러므로 제일 앞의 몇개의 적함수들이 잡음으로 되거나 잡음이 많이 섞인 신호로 된다. 또한 마지막적함수들과 나머지항은 진동신호가 아닌 잡음으로 된다. 따라서 고주파성분을 포함하는 첫번째 결과함수와 추세항을 포함하는 마지막부분의 결과함수를 소거하고 나머지신호들을 가지고 신호를 재구성하여 잡음이 제거된 깨끗한 신호를 얻을 수 있다.

LMD방법에 의한 진동신호의 잡음제거알고리즘은 다음과 같다.

단계 1 주어진 신호 $x(t)$ 를 국부평균분해하여 여러개의 PF들을 얻는다.

단계 2 얻어진 PF들중에서 추세항 그리고 원신호와의 에너지비가 δ 보다 작은 앞부분의 PF들을 선택하여 제거한다. 이때 δ 는 실험적으로 결정한다.

단계 3 나머지신호들을 재구성하여 잡음이 제거된 신호를 얻어낸다.

식 (13)으로 얻어지는 자료에 원신호와의 SN비가 4.3dB이 되게 잡음을 포함시킨 자료를 가지고 모의실험을 진행하였다. δ 는 실험적으로 0.005로 한다.

그림 1의 ㄱ)에서 보여준 신호는 깨끗한 신호 $x \in \mathbf{R}^N$ ($N=1000$)이며 ㄴ)는 우연잡음 $n \in \mathbf{R}^N$ 이 x 에 더해진 신호이다. 신호의 잡음제거결과를 그림 ㄷ)에 보여주었다.

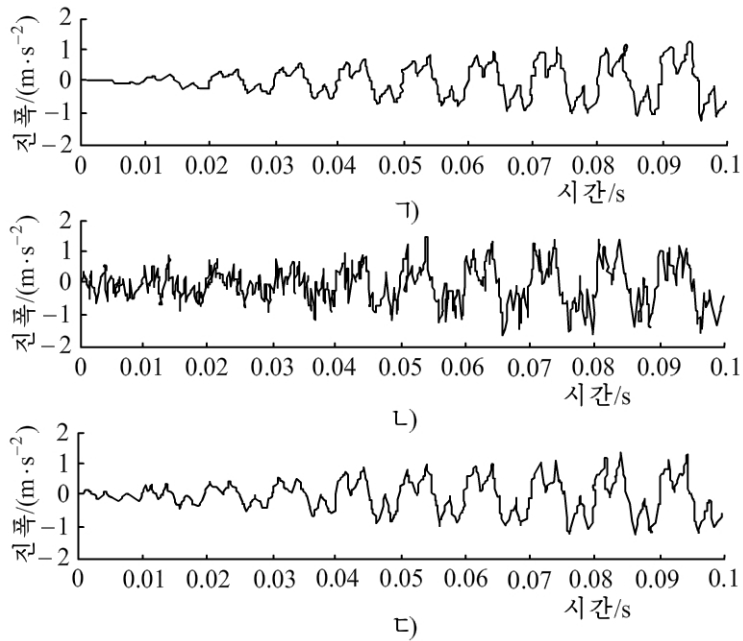


그림 1. 모의신호에 대한 LMD방법의 잡음제거효과

ㄱ) 이상적인 신호, ㄴ) 잡음이 섞인 신호, ㄷ) 잡음이 제거된 신호

그림 1로부터 논문에서 제기한 방법으로 잡음이 제거된 신호는 원신호에 비하여 이상적인 신호와 더 근사하다는 것을 알 수 있다.

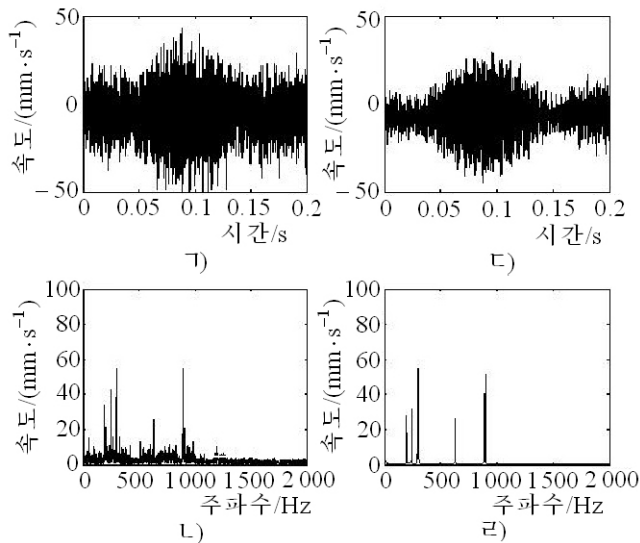


그림 2. 현장신호에 대한 LMD방법의 잡음제거효과

ㄱ) 려파전신호의 시간파형, ㄴ) 려파전신호의 진폭스펙트르,
ㄷ) 려파후신호의 시간파형, ㄸ) 려파후신호의 진폭스펙트르

그림 1의 L)에서 보여준 원신호의 SN비는 4.3dB이지만 C)에서 보여준 잡음이 현저히 제거된 신호의 SN비는 16.34dB이다. 잡음제거전과 잡음제거후의 SN비값의 비교로부터 논문에서 제기한 잡음제거방법이 진동신호의 SN비를 증가시키는 효과적인 방법이라는 것을 알 수 있다.

이 방법을 ○○○세멘트공장의 밀감속기에서 측정한 1단수직방향진동신호에 적용하여 효과성을 검증하였다. 이 감속기의 주전동기정격회전속도는 894r/min, 1단소치차이발수는 23, 1단대치차이발수는 128이고 표본화주파수는 4kHz, 측정시 전원주파수는 53.2Hz인 현장신호의 려파처리를 진행하였다.(그림 2)

그림 2에서 알 수 있는바와 같이 LMD방법에 기초한 진동신호의 잡음제거방법은 현장에서 측정된 비정상신호들에 대한 처리에서 효과적인 방법이다.

맺는 말

논문에서는 국부평균분해방법인 LMD를 회전기계고장진단에 적용하여 새로운 잡음제거방법을 제고하고 종전의 방법인 EMD방법과의 비교를 통하여 효과성을 검증하였다. 수값실험결과 EMD방법보다 신호의 현실적응특성이 더 좋으며 계산시간이 보다 짧다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 63, 7, 30, 주체106(2017).
- [2] AN Xiang-bi et al.; Journal of Academy of ArmoredForce Engineering, 27, 2, 29, 2013.
- [3] N. Baydar et al.; Mech. Syst. Signal Process., 17, 4, 787, 2003.
- [4] S. Jonathan et al.; J. R. Soc. Interface., 2, 5, 443, 2005.

주체108(2019)년 3월 15일 원고접수

Noise Removal Method of Vibration Signal Based on LMD

Jo Myong Jin, Ri Kum Song

In this paper, we propose a noise removal method of vibration signal using LMD, a new signal processing theory.

Key words: LMD, vibration diagnosis, noise removal