김일성종합대학학보 주체110(2021)년
수 학 제67권 제3호

개선된 국부평균분해와 지지벡토르기계에 기초한 한가지 굴음베아링의 고장진단방법

조명진, 김수정

위대한 령도자 **김정일**동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

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

우리는 인민경제 여러 부문에서 리용되는 회전기계들의 정상적인 운영을 보장하는데서 절실하게 제기되는 굴음베아링의 고장진단에서 국부평균분해와 지지벡토르기를 리용하는 한가지 방법을 제기하였다.

전통적인 굴음베아링고장진단방법에는 고속푸리에변환에 기초한 고장주파수판별방법, 경험모드분해에 기초한 방법[2], 웨블레트분해에 기초한 시간－주파수령역해석방법[3], 성김분해리론에 기초한 방법 등이 있다.[1]

론문에서는 신호의 자체적응특성이 좋은 새로운 신호분해방법인 국부평균분해방법을 개선하고 이에 지지벡토르기를 결합하여 굴음베아링고장진단을 진행하는 한가지 방법을 제기하고 그 효과성을 모의자료와 현장측정자료를 리용하여 검증하였다.

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 시간령역에서의 신호분해방법으로서 최근에 많이 리용되는 경험모드분해(EMD)방법이 가지고있는 결함들을 극복한 비정상신호처리방법이다.

EMD방법은 분해속도가 느리고 끝점근방에서의 분해효과가 높지 못한것으로 하여 신호의 실시간적인 처리를 요구하는 진동진단전문가체계의 실시간처리알고리듬으로 리용되는데 일정한 부족점을 가지고있다. 그러나 LMD방법은 신호분해시간이 짧고 끝점처리효과가 좋은것으로 하여 EMD방법의 결함들을 극복함으로써 진동신호처리에서 널리 리용될수 있다.

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

걸음 1 분해하려는 신호 $x(t)$의 모든 국부극점 n_i들을 찾고 련이은 극점들의 평균값 m_i를 계산한다.

$$m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \tag{1}$$

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

걸음 2 대응하는 포락선평가량 a_i 를 다음의 식을 리용하여 계산한다.

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2} \tag{2}$$

포락선평가량 a_i 들을 걸음 1과 같은 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.

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

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

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

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

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

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

여기서

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

이다. 이 계산을 반복하면

$$\lim_{n \to \infty} a_{1n} = 1 \tag{7}$$

로 되는데 실천적으로는 $1 - \delta \leq a_{1(n+1)} \leq 1 + \delta,\ -1 \leq s_{1n} \leq 1$ 의 조건을 만족시키면 반복계산을 중지한다.

걸음 6 포락선평가함수 $a_{1i}(t)$ 들을 곱하여 순간진폭함수 $a_1(t)$ 를 얻는다.

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

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

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

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

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

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

를 원신호로 하여 걸음 1−7을 반복한다. 이 과정을 $u_k(t)$가 단조함수가 될 때까지 반복한다. 즉

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

이로부터 신호 $x(t)$는 다음과 같이 분해된다.

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

이로부터 국부평균분해방법에 의하여 얻어진 모든 적합수의 순간진폭함수와 순간주파수함수를 리용하여 신호의 시간주파수분포를 얻을수 있다는것을 알수 있다.

2. 개선된 국부평균분해방법

국부평균분해방법의 목적은 진동신호로부터 순수주파수신호와 포락선신호를 얻는데 있다. 개선된 국부평균분해방법에서는 베아링진동신호에 먼저 웨블레트파케트분해를 적용하여 좁은 주파수대역의 신호들로 분해한 다음 이 신호들에 국부평균분해를 적용하는것이다.

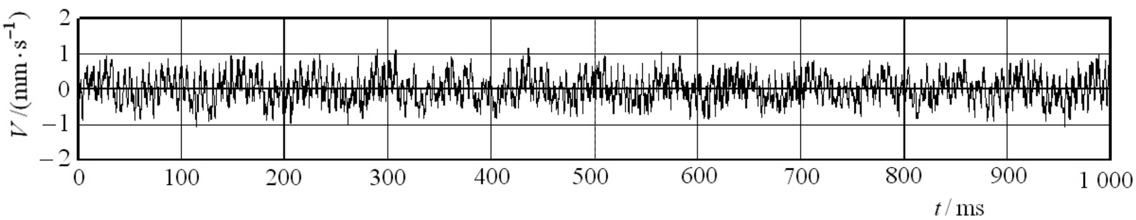

그림 1. 외환고장이 발생한 베아링진동신호

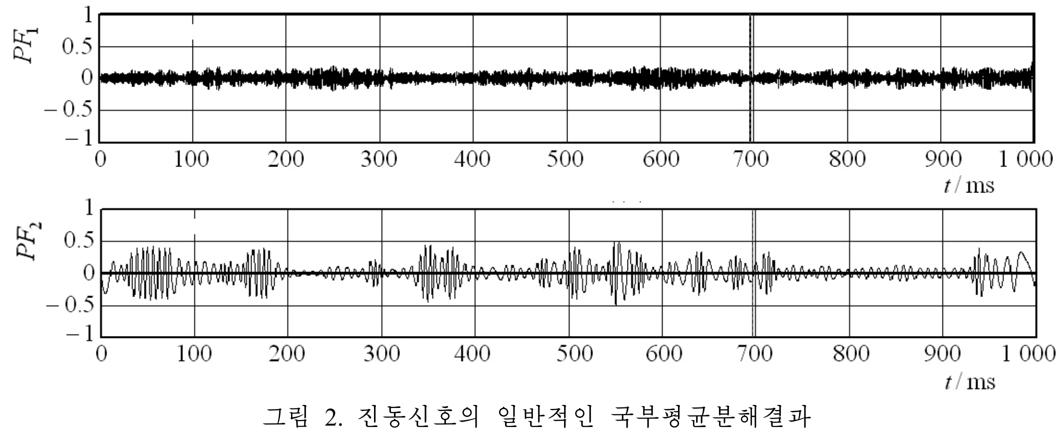

그림 2. 진동신호의 일반적인 국부평균분해결과

개선된 국부평균분해방법의 알고리듬은 다음과 같다.

걸음 1 원신호 $x(t)$를 웨블레트파케트분해하여 n개의 재구성신호 $c_1, c_2, \cdots, c_n$을 얻는다.

걸음 2 첫번째 재구성신호 c_1 을 국부평균분해하여 m_1 개의 적합수 PF_{11}, PF_{12}, $\cdots$, PF_{1m} 과 단조신호 u_{1m_1} 을 얻는다.

걸음 3 u_{1m_1} 을 다음저주파신호 c_2 에 추가하여 c_2' 를 얻는다.

걸음 4 c_2' 를 국부평균분해하여 PF_{21}, PF_{22}, $\cdots$, PF_{2m} 과 단조신호 u_{2m_2} 를 얻는다.

걸음 5 같은 방법으로 u_{2m_2} 를 다음저주파신호 c_3 에 추가하여 c_3' 를 얻고 국부평균분해한다. 이 방법을 웨블레트파케트분해한 전체 재구성신호들에 적용하여 $m_1 + m_2 + \cdots + m_n$ 개의 적합수를 얻는다.

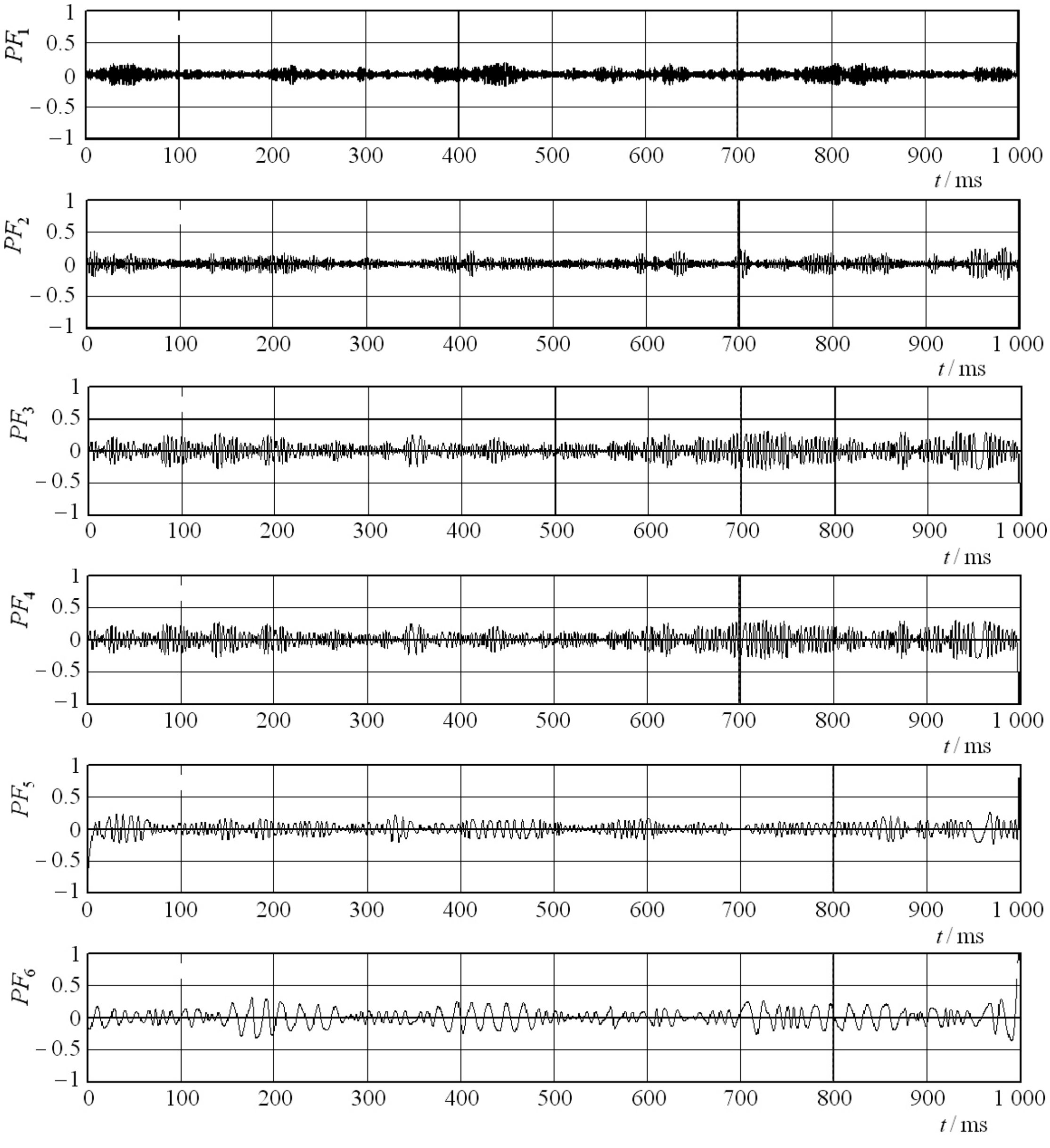

그림 3. 진동신호의 개선된 국부평균분해결과

그림 1에 외환고장이 발생한 베아링진동속도신호파형을, 그림 2에는 그 신호의 일반적인 국부평균분해결과를, 그림 3에는 개선된 국부평균분해결과를 각각 보여주었다.

그림 2와 3으로부터 일반적인 국부평균분해방법으로 얻어진 적함수들은 개선된 국부평균분해방법으로 얻어진 적함수들에 비하여 주파수폭은 더 넓고 적함수의 개수는 적다는것을 알수 있다.

3. 개선된 국부평균분해방법과 지지벡토르기에 기초한 굴음베아링의 고장진단알고리듬

우에서 본바와 같이 개선된 국부평균분해방법은 신호의 주파수성분을 보다 정확히 분해한다는것을 알수 있다. 초기특징벡토르행렬을 개선된 국부평균분해방법에 의하여 얻어진 적함수들을 리용하여 구성하면 초기특징벡토르행렬의 특이값은 진동신호속에 포함된 여러가지 베아링고장특징을 반영할수 있다. 이로부터 초기특징벡토르행렬의 특이값벡토르를 리용한 지지벡토르기(SVM)를 리용하여 굴음베아링에서 나타난 고장을 높은 정확도로 진단할수 있다.

개선된 국부평균분해방법과 지지벡토르기에 기초한 굴음베아링의 고장진단알고리듬은 다음과 같다.

걸음 1 굴음베아링상태가 정상, 외환고장, 내환고장인 경우에 각각 N회씩 측정한 $3N$개 신호를 학습표본과 시험표본으로 나눈다.

걸음 2 매개 신호를 웨블레트파케트분해하여 n개의 재구성신호 $c_1,\ c_2,\ \cdots,\ c_n$을 얻는다.

걸음 3 매 재구성신호를 국부평균분해하여 $n \times m$개의 적함수를 얻는다.

걸음 4 적함수들을 리용하여 초기특징벡토르행렬 A를 얻는다.

걸음 5 초기특징벡토르행렬 A에 특이값분해를 적용하여 초기특징벡토르행렬의 특이값을 얻는다.

걸음 6 지지벡토르기에 기초한 분류기를 설계한다. 학습표본들의 초기특징벡토르행렬들의 특이값들을 리용하여 분류기를 학습시킨다.

걸음 7 시험표본들의 고장특징들을 리용하여 학습된 지지벡토르기분류기를 검증하고 검증된 분류기를 리용하여 베아링의 상태를 진단한다.

4. 적 용 실 례

굴음베아링고장은 일반적으로 내환이나 외환, 굴음체에서 발생한다. 론문에서 제기한 방법을 검증하기 위하여 어느 한 세멘트공장의 밀감속기에서 발생한 베아링고장시 측정된 자료들을 리용하였으며 베아링자호는 6307E형이다. 회전주파수는 830r/min이고 표본화주파수는 4 096Hz이다. 진동신호는 해당한 베아링을 리용한 감속기외함에 고정된 가속도수감부로 얻는다.

다우베치10(D10) 웨블레트토대함수를 리용한 두층 웨블레트파케트분해를 원신호에 적용하여 두번째 층의 4개 주파수대역에 대한 웨블레트파케트분해결수들을 얻고 시계렬을 재구성한다. 다음 그것들을 주파수성분이 높은것으로부터 낮아지는 차례로 순서화한다.($c_1(t)$, $c_2(t)$, $c_3(t)$, $c_4(t)$)

그리고 첫 2개의 적합수들을 선택하여 초기특징벡토르행렬을 구성한다. 이로부터 4×2개의 적합수들이 얻어지며 초기특징벡토르행렬 A를 구성할수 있다. 또한 행렬 A를 특이값분해하여 초기특징벡토르행렬의 특이값 $\sigma_j = [\sigma_j^1,\ \sigma_j^2,\ \cdots,\ \sigma_j^8]$을 얻고 이것을 지지벡토르기분류기의 고장특징벡토르로 리용한다.

가우스반경토대핵함수(Gauss radial basis kernel function)를 선택하여 3개의 지지벡토르기결정함수를 계산하였다. 우선 지지벡토르기 1에서 정상상태를 $y=+1$로, 비정상상태를 $y=-1$로 정의한다. 그러므로 정상굴음베아링은 지지벡토르기 1에 의하여 고장조건으로부터 갈라낼수 있다. 다음 지지벡토르기 2에서는 외환조건을 $y=+1$로, 그밖의 조건을 $y=-1$로 정의한다. 그러므로 외환고장은 지지벡토르기 2에 의하여 갈라낼수 있다. 마지막으로 지지벡토르기 3에서 내환고장을 $y=+1$로, 다른 상태를 $y=-1$로 정의한다. 그러면 지지벡토르기 3에 의하여 내환고장을 갈라낼수 있다. 매 작업상태에서 학습표본들중 6개의 표본을 우연적으로 뽑는다. 나머지는 시험표본들이다. 지지벡토르기들을 적용하여 모든 시험표본들을 성과적으로 동정하였다. 개선된 국부평균분해에 기초한 시험표본들의 고장진단결과를 표에 보여주었다.

표로부터 학습된 지지벡토르기분류기가 작업조건과 굴음베아링의 고장상태를 정확히 분류할수 있다는것을 알수 있다. 지지벡토르기분류기는 굴음베아링상태를 식별할수 있으며 제한된 학습표본들만을 리용해야 하는 경우에도 고장진단에 적용할수 있다는것을 보여준다.

표. 개선된 국부평균분해에 기초한 시험표본들의 고장진단결과

No.	시험표본	고장형태벡토르								SVM1	SVM2	SVM3	동정결과
1	정상	20.976	18.085	14.693	11.267	7.8654	7.1287	3.064	1.6997	1	−1	−1	정상
2	정상	19.409	17.259	15.084	12.768	6.9766	5.67	2.3414	1.4259	1	−1	−1	
3	정상	18.512	17.196	14.955	12.065	7.2653	3.1039	2.1983	1.1633	1	−1	−1	
4	외환고장	128.86	98.225	80.898	66.901	38.141	22.214	19.985	12.489	−1	1	−1	외환고장
5	외환고장	117.26	93.905	89.396	69.11	53.805	16.906	6.7987	6.4459	−1	1	−1	
6	외환고장	117.35	108.39	94.052	66.816	38.12	29.679	14.721	8.3771	−1	1	−1	
7	내환고장	176.3	152.7	147.12	139.92	100.41	60.77	16.484	12.627	−1	−1	1	내환고장
8	내환고장	175.97	148.76	132.49	112.86	111.49	36.807	11.888	8.4918	−1	−1	1	
9	내환고장	198.16	148.04	145.58	139.16	77.828	47.676	14.112	11.443	−1	−1	1	

맺 는 말

굴음베아링고장진동신호가 일반적으로 비정상성을 가지므로 비정상신호처리에 적합한 개선된 국부평균분해방법에 지지벡토르기를 결합한 고장진단방법을 제기하였다. 개선된 국부평균분해와 지지벡토르기에 기초한 고장진단방법은 표본수가 적은 경우에도 굴음베아링의 작업상태를 분류하고 고장상태를 효과적으로 정확히 분류할수 있다는것을 내환고장과 외환고장이 있는 현장측정신호에 대한 해석결과를 통하여 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] 리금성 등; 기계공학, 4, 4, 주체108(2019).
[2] Lei Wang et al.; Mechanical Systems and Signal Processing, 27, 2, 24, 2018.
[3] N. Baydar et al.; Mech. Syst. Signal Process., 17, 4, 787, 2003.
[4] J. S. Smith; J. R. Soc. Interface., 2, 5, 443, 2005.

주체110(2021)년 3월 5일 원고접수

A Roller Bearing Fault Diagnosis Method based on Improved LMD and SVM

Jo Myong Jin, *Kim Su Jong*

We propose a method by improving the Local Mean Decomposition(LMD), a self-adaptive time-frequency analysis method, and a roller bearing fault diagnosis method based on improved Local Mean Decomposition and Support Vector Machine (SVM). We verify the effectiveness with simulation and field signals.

Keywords: LMD, product function, fault diagnosis, roller bearing