

필터뱅크를 이용한 진동신호 분석

홍기섭, 정우갑, 한성환, 박우룡, 배현덕
충북대학교 전자공학과

Vibration Signal Analysis using Filter Banks

Ki-Seob Hong, Woo-Gab Jeong, Sung-Hwan Han, Woo-Ryong Park, Hyeon-Deok Bae
Department of Electronics, Chungbuk National University
E-Mail : hongkiss@hanmail.net, hdbae@cbucc.chungbuk.ac.kr

요 약

기계설비의 진동신호와 음향신호에서 결합신호를 검출하기 위해 본 논문에서는 ALE와 트리구조 필터뱅크를 이용 진동분석 시스템을 설계 구현하였다.

ALE는 신호를 전처리함으로써 진동신호의 주기성분을 제거하여 결합신호검출을 용이하게 하며 트리구조 필터뱅크는 비정제적 결합신호를 전 대역에서 동일한 분해도로 분해한다. 설계된 진동분석 시스템은 모의실험과 DSP상의 구현을 통해 그 성능이 평가하였다.

I. 서 론

기계설비에서 발생하는 진동신호와 음향신호의 측정은 기계설비의 동작상태를 진단하는데 효과적으로 이용된다. 산업분야에서 사용되는 기계에서는 동작모드 변화로 인해 발생신호들이 비정제적(nonstationary) 성질을 가지므로 기계설비의 상태를 감시하고 기계적 결함(fault)을 분석하는 데 많은 어려움이 있다[1,2]

지금까지 FFT(Fast Fourier Transform) 분석장비를 사용해서 진동신호를 분석하여 왔다. 그러나, 기계설비에서 발생하는 신호들은 시간에 종속적인 주파수 특성을 갖는 시변(time-varying) 신호이므로 이러한 신호를 처리하기 위해서는 신호의 시간-주파수 특성을 동시에 볼 수 있는 방법이 필요하다[1,2]. STFT(Short Time Fourier Transform)이 이러한 역할을 해주지만 고정된 윈도우 길이로 인하여 결합신호에 대한 정확한 주파수 정보를 추출하는데 어려움이 있다[1,2].

기계설비의 초기 결함에 의해서 발생하는 신호는 크기가 작기 때문에 정상동작시 고유하게 발생하는 주기적인 신호성분에 의해 그 특성을 찾는데 어려움이 있다.

따라서, 주기적인 신호성분을 제거시켜서 결합에 해당하는 신호성분만을 추출해 낼 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 기계에서 발생하는 신호를 ALE(Adaptive Line Enhancer)를 이용 전처리[3]하여 주기적 신호성분을 제거한 후 트리구조 필터뱅크(Tree-Structured Filter Bank)를 사용 신호를 분석하였다.

ALE와 트리구조 필터뱅크를 사용하는 진동신호분석 시스템 성능을 실제 신호 데이터를 이용 Matlab상에서 모의실험을 통해 평가하였고, TI사의 TMS320C6211 DSP상에 구현하여 확인하였다.

II. ALE와 트리구조 필터뱅크를 이용한 진동신호분석 시스템

진동신호분석 시스템은 그림 1과 같이 ALE와 트리구조 필터뱅크로 구성된다.

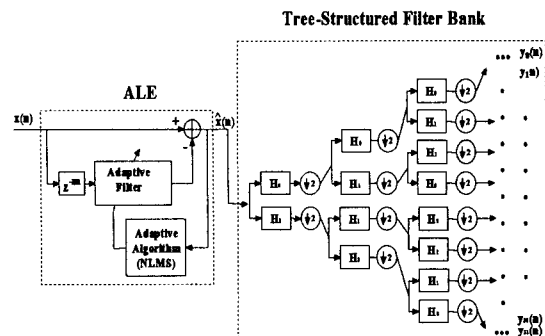


그림 1. 진동신호분석기의 구조

1. ALE

기계설비의 초기결합신호는 매우 작으므로 ALE를 이용 기계설비에서 발생하는 신호를 전처리하여 주기적 신호를 제거함으로써 조기검출이 가능해진다. 이 방법은 결합신호와 주기적 정상동작신호의 대역이 중첩되어 있는 경우 더욱 효과적으로 사용될 수 있다. 그리고, 두 신호대역이 분리되어 있을 때도 진폭이 큰 주기신호성분을 제거함으로써 결합신호 검출을 용이하게 한다[3].

ALE에서는 적절한 지연(z^{-m})을 이용 primary 입력과 reference 입력사이에 상호 상관성을 작게 함으로서 주기신호성분의 제거가 가능하다. 지연이 primary 입력에 가해지는 경우 적응필터에 의한 지연보다 커야 하므로 일반적으로 reference 입력에 지연을 가하여 ALE를 구성한다[6]. 여기서 ALE의 적응 알고리즘은 입력신호 변화에 영향이 작은 NLMS를 사용하며, 계수 갱신식은 다음과 같다[5].

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{\|x(n)\|^2} x(n)e(n) \quad (1)$$

2. 트리구조 필터뱅크

기계설비에서 결합신호는 임펄스성의 비정제적 성질을 가지므로 웨이브렛 변환과 유사한 필터뱅크를 이용 주파수 특성을 분석하여야 한다[4]. 그리고, 결합신호의 분석에서는 고주파대역에서도 저주파대역과 동일한 주파수 해상도가 필요하므로 트리구조의 필터뱅크가 필요하다[1,4]. 트리구조 필터뱅크는 2채널 QMF (Quadrature Mirror Filter)를 근간으로 고역, 저역 양쪽으로 그림1과 같이 구현된다. 여기서, Symlet Wavelet을 사용 고역통과필터와 저역통과 필터가 QM 특성을 가지도록 하여 16차 FIR 필터를 설계하였다.

기계설비 결합신호 분석에서 주파수 해상도는 필터뱅크 레벨수를 증가시킬수록 유리하나, 본 연구에서는 5-레벨 트리구조 필터뱅크를 설계하여 전체대역을 그림2와 같이 32대역으로 나누어 신호를 분석하였다.

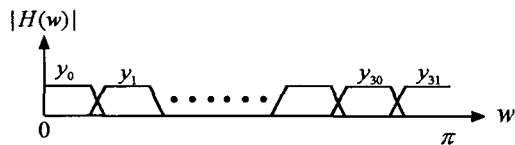


그림 2. 5-레벨 트리구조 필터뱅크의 주파수 응답

III. 모의실험

ALE와 트리구조 필터뱅크를 이용한 신호분석 시스템의 성능평가는 진동신호와 음향신호의 실제 데이터를

이용 Matlab상에서 모의실험을 통해 이루어졌다. ALE의 적응필터는 80차이며 필터뱅크는 신호의 전체대역을 32대역으로 분해하기 위해 5레벨로 설계하였다. 모의실험에서 입력신호는 회전하는 베어링의 진동을 가속도 센서로 취득한 신호와 팬(fan)에서 발생하는 음향신호를 마이크로폰으로 획득한 신호를 사용하였다.

1. 진동신호분석

진동신호로 그림3과 같은 정상신호와 결합신호를 사용하였으며 이 신호는 300[rpm]으로 회전하는 베어링의 진동가속도 신호이다. 베어링의 진동신호는 취득설비의 평형성, 가속도 센서의 특성으로 주기성이 미약하여 결합이 발생하는 주파수 대역에 주기신호를 부가하여 사용하였다.

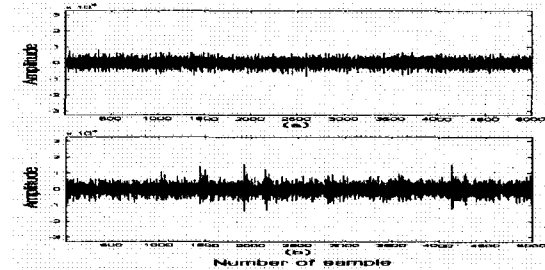


그림 3. 진동신호
(a) 정상신호, (b) 결합 발생 신호

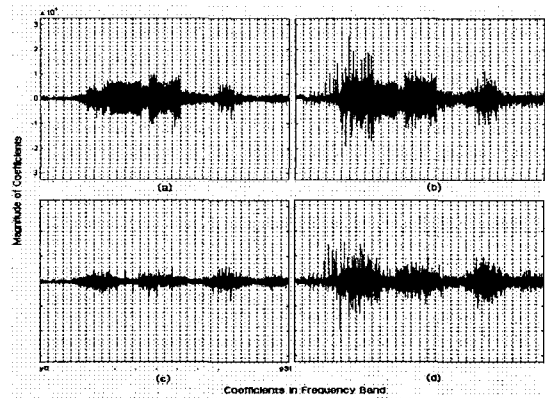


그림 4. 진동신호 분석결과
(a) 필터뱅크로 분해한 정상신호
(b) 필터뱅크로 분해한 결합발생신호
(c) ALE와 필터뱅크로 분해한 정상신호
(d) ALE와 필터뱅크로 분해한 결합발생신호

그림 3의 진동신호를 진동분석 시스템의 입력으로 하여 32대역으로 분해한 신호는 그림4와 같다. 여기서, 샘플

플링 주파수는 8[kHz]이며 ALE의 지연은 15샘플이다.

2. 음향신호분석

공업용 팬에서 발생하는 음향신호의 정상신호와 결합신호는 그림5와 같다.

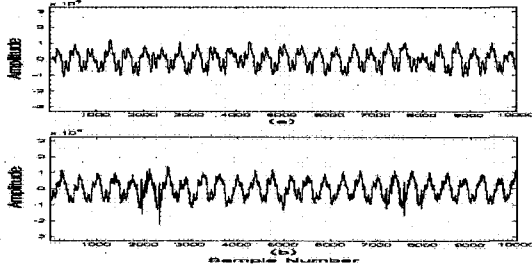


그림 5. 음향신호

(a) 정상신호, (b) 결합발생신호

음향신호에서 ALE의 지연을 5샘플로, 샘플링 주파수를 8[kHz]로 하여 분석한 결과는 그림6과 같다.

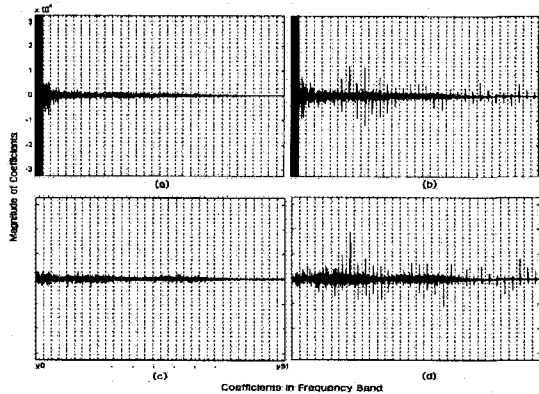


그림 6. 음향신호 분석결과

- (a) 필터뱅크로 분해한 정상신호
- (b) 필터뱅크로 분해한 결합발생신호
- (c) ALE와 필터뱅크로 분해한 정상신호
- (d) ALE와 필터뱅크로 분해한 결합발생신호

진동신호와 결합신호의 분석결과인 그림4와 그림6으로부터 ALE를 사용한 경우가 결합신호 검출에 효과적임을 알 수 있다. 그리고, 결합신호의 주파수대가 주기성 신호와 중첩이 되어도 ALE를 통해 주기신호가 제거됨으로 결합신호 검출이 용이함을 알 수 있다. ALE의 지연은 주기성 신호의 주파수대에 따라 적절히 선택되어야 효과적으로 주기신호를 제거할 수 있으므로 기계설비의 종류, 사용환경에 따라 지연을 결정해야 한다.

VI. 진동신호분석 시스템 구현

진동신호분석 시스템은 그림7과 같이 고정 소수점 DSP인 TMS320C6211 DSK 보드를 사용했으며, host PC의 패러렐 포트를 사용하여 DSK 보드를 제어할 수 있도록 구성했다.

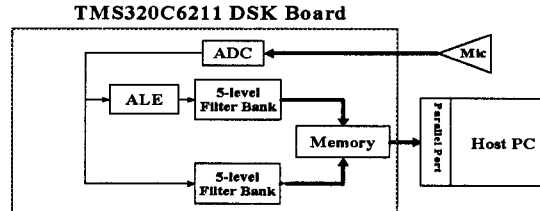


그림 7. 진동신호분석 시스템의 구성

가속도 센서를 사용하여 파일형태로 얻어진 진동신호는 PC의 사운드 카드를 통해 DSK 보드의 ADC로 보내준다. 이 신호를 ADC에서 8[kHz]로 샘플링하여 시스템의 입력으로 사용하였다. 그리고, 음향신호를 마이크로폰으로 획득하여 처리하였다.

신호분석 시스템은 ALE와 5-레벨 필터뱅크를 조합하여 사용하는 부분과 5-레벨 필터뱅크만을 사용하는 부분으로 구성된다. 각각의 처리된 신호를 메모리에 저장하고 이것을 host PC에서 표시할 수 있도록 했다.

DSK 보드에 들어가는 프로그램은 C언어와 assembly 언어를 사용했고 host PC에 들어가는 프로그램은 MFC를 사용하여 프로그램 했다.

고정소수점 DSP인 C6211에서는 실수형 곱셈과 나눗셈을 위한 명령어가 존재하지 않는다. 실수연산 루틴을 호출해서 쓰게되면 많은 계산량의 손실을 가져오게 되므로 정수형 곱셈과 shift 연산을 사용하여 실수의 곱셈과 나눗셈을 하였다. 연산에서 사용되는 모든 데이터 및 변수는 정수형으로 변환하고 실수형 계수도 Q15 포맷을 사용하여 short로 변환된다. 이렇게 함으로서 모든 실수와 정수는 비트15가 부호비트이고 나머지 부분인 부호비트 다음부터 가상 소수점으로 취급하는 Q15 포맷을 사용할 수 있다.

곱셈은 두 개의 16비트 short 데이터를 곱해서 32비트 int형을 만든다. 이것을 다시 16비트 short로 양자화를 해주어야 한다. 즉, int형 데이터를 LSB로 15번 shift ($2^{15} = 32768$)를 하고 이것을 short형으로 변환해주면 된다.

나눗셈은 분모와 분자 데이터를 모두 양수로 만들고 다음과 같은 방법으로 처리한다. 실수 1은 Q15 포맷으로 변환했을 때 32767(=0x7FFF)이 된다. 이것을 short

형 분자에 곱해주고 분모로 나누어 값이 0x7FFF보다 크면 출력결과는 32767로 하고 아니면 short형으로 변환해주면 된다.

이와 같이 실수의 곱셈과 나눗셈을 해줌으로서 계산량을 많이 줄일 수 있다. 또한 software pipelining과 intrinsic 명령어를 사용하여 코드를 최적화함으로써 계산량을 많이 줄일 수 있다. software pipelining은 주어진 DSP의 구조에서 프로그램 구현이나 컴파일 때 인위적으로 병렬처리를 하도록 해준다[7]. C언어로 작성한 프로그램을 컴파일 하였을 때 하나의 명령어로 끝날 수 있는 명령어가 여러 개의 명령어로 변환되는 경우와 C언어에서 여러 가지 명령어로 실행되는 경우가 있다. intrinsic은 C언어에서 간단한 어셈블리 명령어를 실행할 수 있도록 하여 계산량의 낭비를 막아준다[8].

TMS320C6211 DSK 보드에서 처리된 결과를 확인하기 위한 인터페이스 프로그램이 필요하다. 이것은 MFC와 TI사의 라이브러리를 사용하여 프로그램 했다. DSK 보드를 실행시킬 수 있도록 보드를 초기화하고 DSP 메모리에 COFF 실행파일을 실장하여 동작시키도록 프로그램 했다.

DSP를 이용 구현된 진동분석 시스템에서 그림3(b)의 2500샘플을 처리한 결과는 그림8과 같다. 그림8에서 막대 그래프로 표시된 결과는 처리된 신호의 32개 각 대역 에너지를 나타낸 것이다. 구현된 진동분석 시스템의 처리결과로도 진동분석에 ALE의 사용이 효과적임을 알 수 있다.

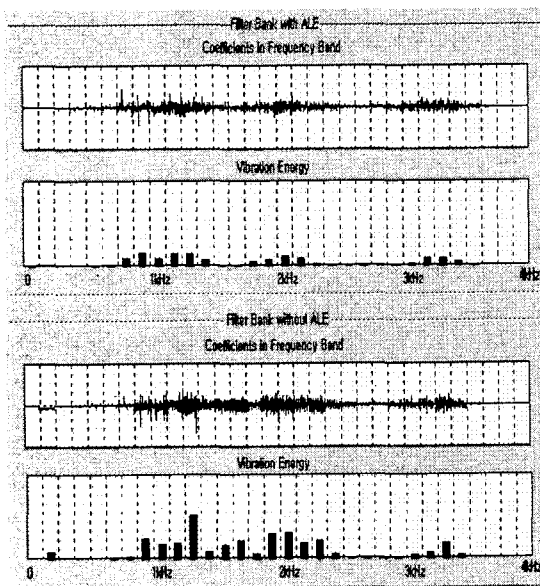


그림 8. DSP상에 구현된 진동분석 시스템의 진동신호 처리결과

V. 결 론

기계설비의 회전기에서 발생하는 결합신호의 검출은 결합신호가 작고 주파수대가 주기적신호와 중첩될 경우 어려움이 있다. 본 논문에서는 기계설비에서 발생하는 신호를 ALE로 전처리하여 주기신호성분을 제거한후 트리구조 필터뱅크로 분해하는 것이 결합신호 검출에 효과적임을 보였다.

성능평가는 Matlab상의 모의실험과 DSP상의 구현을 통해 하였다. 이 실험결과 데이터를 바탕으로 결합신호 패턴분석을 한다면 보다 좋은 결과를 가져올 수 있으리라 본다.

감사의 글

본 연구에 도움을 주신 한국과학기술원(KAIST) 소음 제어 연구실 최영철씨께 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] G.Y. Yen and Kuo-Chung Lin, "Wavelet Packet Feature Extraction for Vibration Monitoring," *Proceedings of IEEE International Conference on Control Application*, vol. 2, pp. 1573-1578, 1999.
- [2] He Zhengjia, Zhao Jiyuan, He Yibin and Meng Qingfeng, "Wavelet Transform and Multiresolution Signal Decomposition for Machinery Monitoring and Diagnosis," *Proceedings of The IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 724-727, 1996.
- [3] S.K. Lee and P.R. White, "Fault Diagnosis of Rotating Machinery using Two-stage Adaptive Line Enhancer," *IEE Colloquium on Modeling and Signal Processing for Fault Diagnosis*, pp. 6/1 -6/6, 1996
- [4] P.P. Vaidyanathan, *Multirate Systems and Filter Banks*, Prentice-Hall, 1993
- [5] Simon Kaykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice-Hall, 1996
- [6] Brnard Widrow and Samuel D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, 1985
- [7] *TMS320C6000 Optimizing C Compiler User's Guide*(Literature Number SPRU187E), Texas Instruments
- [8] *TMS320C62x/67x Programmer's Guide*(Literature Number SPRU198C), Texas Instrument