

CBM 시스템에서 2채널 진동 센서 기반 진동 계측치 신뢰성 향상 방법

Dual Vibration Sensor-Based Method for Improving Vibration Measurement

Reliability in CBM Systems

한대근^{*†}, 김나연^{*}, 차윤재^{*}, 박성호^{**}Daegeun Han^{*†}, Nayeon Kim^{*}, Yunjae Cha^{*}, Seongho Park^{**}

초 록 철도차량 차축 베어링에 대한 진동 신호 기반의 결함 감지에서 진동 센서는 진단 정확도에 직접적인 영향을 미치므로, 계측치의 신뢰성이 중요한 요소이다. 본 논문에서는 이러한 계측치의 신뢰성 향상을 목적으로 2채널 진동 센서 기반 H/W 설계를 통해 센서 신호의 SNR을 증가시키며, 상관도 분석으로 센서 이상을 실시간 검출하는 방법을 제안한다.

주요어 : CBM 시스템, 차축 베어링, 진동 센서, 상호상관계수, 자기상관계수

1. 서 론

철도차량의 주요 부품 중 하나인 차축 베어링은 결함 발생 시 안전사고 위험도가 높아 [1], CBM 시스템에서 진동 신호 기반의 결함 감지 방법이 활발히 연구되고 있다. 이때 감지 성능은 장착된 진동 센서의 계측치에 상당 부분 의존하므로, 계측치의 신뢰성이 중요하다. 본 논문에서는 계측치의 신뢰성 향상을 목적으로 2채널 진동 센서 기반 H/W 설계를 통해 SNR을 증가시키며, 기존 센서 이상 검출 방법 (신호 범위 초과 감지, 무진동 상태에서 ST 핀 활용 등)에서 더 나아가 센서 신호의 상관도 분석으로 열차 운행 중 센서 이상을 실시간 검출하는 방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 센서부 H/W 설계 방법

센서부 H/W는 Fig.1과 같이 동일한 사양의 진동 센서를 이용하여 대칭 구조로 설계된다.

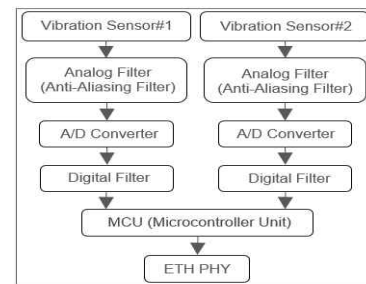


Fig. 1 Sensor H/W Block Diagram

A/D Converter, Anti-Aliasing용 아날로그 필터, Quantization 노이즈 감소 등을 위한 디지털 필터가 추가 구성된다. 동일한 사양의 진동 센서이므로 각 센서 신호 x_1 과 x_2 간에는 서로 높은 상관계수 ρ 를 보인다. 그러므로 노이즈가 독립적이라고 가정하였을 때, 두 신호를 Averaging함으로써 Eq.(1)에 따라 SNR에서 최대 약 3dB Gain을 얻을 수 있다. 계측된 진동 데이터는 Ethernet PHY를 통하여 상위 Level 장치에 전송된다.

$$SNR_{avg} = SNR + 10\log(1 + \rho) \quad (1)$$

2.2 센서 이상 검출 방법

센서 이상 검출은 총 두 단계에 걸쳐 진행될 수 있다. 1단계에서 센서 이상 발생 여부가 검출되며, 2단계에서는 그 이상 센서가

† 교신저자: 메인트랜스(주) 철도차량연구소
부품개발1팀 (dae450@maintrans.co.kr)

* 메인트랜스(주) 철도차량연구소 부품개발1팀

** 메인트랜스(주) 철도차량연구소 부품개발사업실

판별된다. 센서 이상이 검출될 시 2.1절에서 설명된 Averaging 과정은 수행되지 않으며, 해당 이상 센서의 신호는 시스템 처리에서 배제된다.

1단계에서는 x_1 과 x_2 간의 정규화된 상호상관계수가 활용된다.

$$C^{(m)}(k) = \frac{\sum (x_1^{(m)}[n] - \bar{u}_1^{(m)})(x_2^{(m)}[n+k] - \bar{u}_2^{(m)})}{\sqrt{\sum (x_1^{(m)}[n] - \bar{u}_1^{(m)})^2} \cdot \sqrt{\sum (x_2^{(m)}[n] - \bar{u}_2^{(m)})^2}} \quad (2)$$

Eq.(2)는 m-th cycle의 정규화된 상호상관계수 식을 나타낸다. CWRU Bearing 데이터셋 [2]을 활용한 MATLAB 기반 시뮬레이션 결과, Fig.2에서 확인할 수 있듯이 자기상관계수를 제외한 상호상관계수 값은 낮게 나타난다.

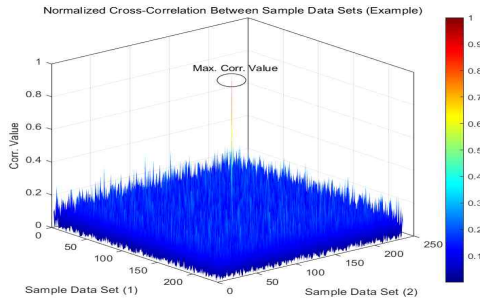


Fig. 2 Normalized Cross-Correlation (Example)

센서 이상 여부는 Eq.(3)과 같이 M_1 -cycle 정규화된 상호상관계수의 누적 Averaging 값을 Threshold δ_1 와 비교하여 검출된다. Fig.3은 그 결과의 예시를 보여준다.

$$\frac{1}{M_1} \sum_{m=0}^{M_1-1} \max_k (|C^{(m)}(k)|) > \delta_1 \quad (3)$$

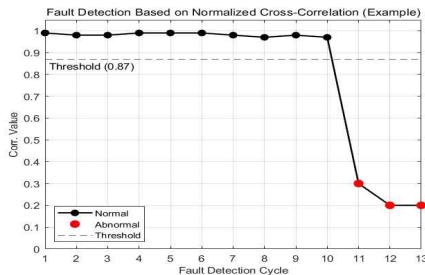


Fig. 3 Fault Detection Based on NCC (Example)

1단계에서 센서 이상이 확인될 시 2단계에서 x_1 과 x_2 신호 각각의 정규화된 자기상관계수를 활용하여 그 이상 센서가 판별된다.

$$R_i^{(m)}(k) = \frac{\sum (x_i^{(m)}[n] - \bar{v}_i^{(m)})(x_i^{(m)}[n+k] - \bar{v}_i^{(m)})}{\sum (x_i^{(m)}[n] - \bar{v}_i^{(m)})^2} \quad (4)$$

Eq.(4)는 x_i 에 대한 m-th cycle의 정규화된 자기상관계수 식을 나타낸다. 해당 계산식은 $O(N^2)$ 의 높은 복잡도를 가지므로, 계산 시 $O(N \log N)$ 의 복잡도를 갖는 FFT/IFFT 방법 (Eq.(5))을 적용한다.

$$R_i^{(m)}(k) = \frac{1}{\sum (x_i^{(m)}[n] - \bar{v}_i^{(m)})^2} \cdot IFFT(|FFT(x_i^{(m)}[n] - \bar{v}_i^{(m)})|^2) \quad (5)$$

이상 센서는 Eq.(6)과 같이 L -lag 포함 M_2 -cycle 정규화된 자기상관계수의 누적 Averaging 값과 기준치 E_{ref} 의 차이를 Threshold δ_2 와 비교하여 판별된다.

$$\left| \frac{1}{M_2} \sum_{m=0}^{M_2-1} \left(\frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} |R_i^{(m)}(k)| \right) - E_{ref} \right| < \delta_2 \quad (6)$$

3. 결 론

진동 계측치 신뢰성 향상을 목적으로 2채널 진동 센서 기반 H/W 설계 방법을 제안하여 SNR 향상을 수식으로 확인하였으며, 상관도 분석으로 센서 이상을 실시간 검출할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 향후 연구에서 H/W 구현 후 실험적 검증 계획이다.

참고문헌

- [1] 박병수, 임재용 (2024) 차축베어링 상태 평가를 위한 전체진동값에 대한 실험적 연구, 2024년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집, KSR2024F239, pp. 252-252
- [2] CWRU Bearing Data Center. [Online] Available: <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter>