소리 정보를 이용한 선로전환기의 스트레스 탐지

최용주*, 이종욱*, 박대희*,†, 이종현**, 정용화*, 김희영***, 윤석한**
*고려대학교 컴퓨터정보학과, **(주)세화, ***고려대학교 응용통계학과
{aaa928, eastwest, dhpark}@korea.ac.kr, sh@sehwa.biz, {ychungy, starkim}@korea.ac.kr, shy5406@sehwa.biz.

Stress Detection of Railway Point Machine using Sound Analysis

Yongju Choi*, Jonguk Lee*, Daihee Park*,†, Jonghyun Lee**, Yongwha Chung*, Heeyoung Kim***, Sukhan Yoon**
*Dept. of Computer & Information Science, Korea University,
**Sehwa Co,
***Dept. of Applied Statistics, Korea University.

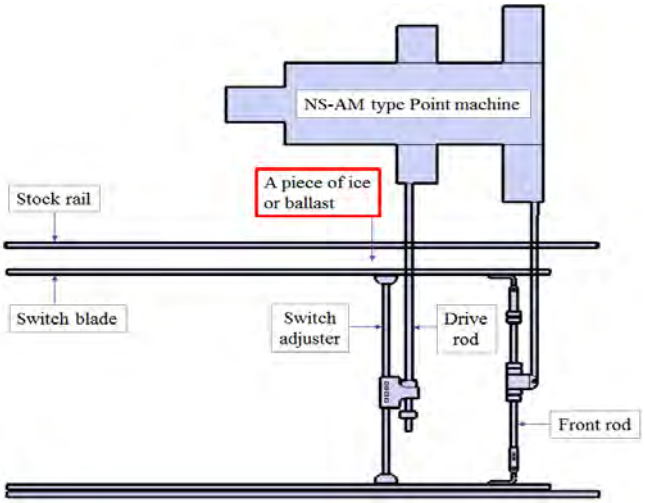
요 약

열차의 진로를 제어하는 선로전환기는 열차의 안정적인 주행에 있어서 매우 중요한 시설이다. 본 논문에서는 선로전환기의 작동 시 발생하는 소리 정보를 이용하여 선로전환기의 스트레스를 탐지하는 시스템을 제안한다. 먼저 제안하는 시스템은 선로전환기에 스트레스가 쌓인 상태의 소리 정보와 스트레스가 제거된 소리 정보를 수집한 후, 다양한 소리특징들을 추출한다. 추출된 특징들로 부터 t-test를 이용하여 유의성이 확보된 소리 특징 파마미터만을 최종 특징벡터로 선택한다. 마지막으로, 소리 특징 벡터를 입력으로 하는 이진 분류기인 SVM(Support Vector Machine)을 이용하여, 선로전환기의 스트레스 상태 여부를 실시간으로 탐지한다. 실제 테스트용 선로전환기에서 취득한 소리 정보 데이터 셋을 이용하여 본 논문에서 제안하는 시스템의 성능을 실험적으로 검증한다.

1. 서 론

현재 산업에 있어서 철도가 차지하는 비중이 지속적으로 증대됨에 따라 철도의 안정적인 주행이 그 어느 때보다 중요해지고 있다. 철도 산업에서 철로를 구성하는 요소 중 하나인 선로전환기는 열차의 진로를 제어하는 철도 부품 중 하나로, 선로전환기의 결함은 열차의 탈선 및 충·추돌을 발생시킬 수 있기 때문에 선로전환기의 이상여부를 조기에 탐지하는 것은 매우 중요한 문제이다[1-2]. 과거 2000년부터 최근 10년간의 철도 사고를 살펴보면 선로전환기 장애는 전체 철도 신호장치 장애의 27%를 차지하며, 철도 시스템의 운영 및 유지보수 측면에서 가장 많은 시간을 소모하는 설비로 분류 된다. 따라서 수작업에 의한 현재의 철로 유지보수 시스템을 실시간으로 자동 탐지하는 시스템으로 전환하는 것은 경제적 측면뿐만 아니라 안전에 있어서도 반드시 필요한 요소이다[3].

외부 환경에 노출되어 작동하는 선로전환기의 특성 상, 선로전환기의 부품들은 외부 충격들을 자주 받게 된다. 이러한 외부 충격들로 인해 선로전환기는 계속적인 물리적 손상을 받게 되며 이는 선로전환기의 미세한 균열이나 누적 손상을 야기하게 되어 결국 선로전환기의 스트레스로 이어진다[4]. 특히, 선로전환기의 Stock rail과 Switch blade 사이에 이물질(얼음, 자갈 등)이 끼어서 발생하는 스트레스(그림 1 참조)는 선로전환기의 고장에 이르기 전 단계를 의미함으로, 선로전환기의 적절한 교체시기를 예측하기 위해서는 선로전환기가 받는 스트레스 해석이 매우 중요하다[5].



(그림 1) 선로전환기의 구조

선로전환기에 관한 최근의 연구동향을 살펴보면, 선로전환기의 결함을 조기에 탐지하고자 하는 많은 노력들이 철도 선진국을 중심으로 진행되고 있다[5]. 예를 들면, Vileiniskis 등[6]은 선로전환기를 구동시키는 모터의 전류값의 변화를 이용하여, 미리 설정해 둔 임계값을 벗어나는

† 교신저자

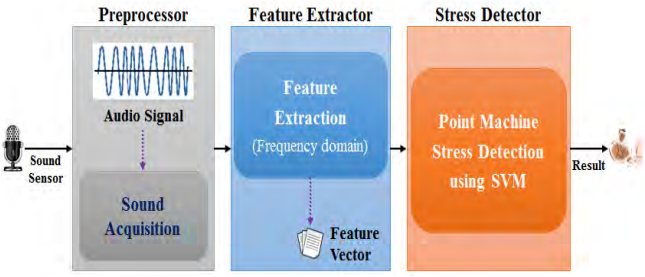
지 여부를 탐지하였으며, Eker 등[7]은 PCA(Principal Components Analysis)와 SVM(Support Vector Machine)을 이용하여 Drive rod가 잘못 동작된 불일치(out-of adjustment) 상태 여부를 탐지하였다. 또한 Asada 등[1-2]은 선로전환기로 유입되는 전기적 신호들(전류와 전압)을 이용하여 선로 전환기의 상태를 모니터링하는 시스템을 제안하였다. 기존의 연구들은 모두 선로전환기의 모터를 동작시키기 위해 입력되는 전기적 신호에 기반 한 것으로 본 연구에서 수행하고자 하는 소리에 기반 한 연구는 현재까지 보고된 바 없다.

본 논문에서는 선로전환기의 작동 소리를 이용하여 선로전환기의 스트레스를 탐지하는 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 선로전환기의 스트레스 탐지문제를 이진 분류 문제로 해석하여 이진 분류기의 대표적인 모델인 SVM모델을 기반으로 한 구조로써, 정상 작동 소리와 스트레스가 쌓인 소리를 구분하여 미리 학습하고, 스트레스가 쌓인 소리가 실시간으로 탐지될 경우 선로전환기의 관리자에게 알람을 경고한다. 제안된 시스템은 선로전환기의 노후화 여부를 조기 판단해서 예정된 사고를 사전에 예방하기 위해 선로전환기의 교체시기를 판별하는 유용한 정보로 사용될 것으로 기대된다.

2. 소리정보 기반의 선로전환기 스트레스 탐지 시스템

본 논문에서 제안하는 소리 기반의 선로전환기 스트레스 탐지 시스템의 구조는 그림 2와 같다. 시스템은 크게 2개의 모듈로 구성된다. 테스트용 선로전환기에 설치한 녹음기에서 작동 소리를 취득한 후 스트레스 탐지를 위한 최적의 특징 벡터를 생성하는 모듈과 실시간 스트레스 탐지 모듈로 구성된다.

각 모듈의 기능은 다음과 같다. 1) 특징 추출 모듈에서는 스트레스 소리 탐지를 위한 중요한 소리 특징들을 선택하기 위하여 t-test를 이용하여 유의성이 확보된 특징들을 선택하여 특징 벡터로 생성한다. 2) 스트레스 상황 탐지 모듈에서는 미리 훈련을 마친 SVM을 기반으로, 실시간으로 유입되는 소리신호의 스트레스 탐지 여부를 판단한다. 만약 실시간으로 유입되는 소리 신호가 스트레스 소리로 구분될 경우 이를 선로전환기 관리자에게 신속하게 통보함으로써 유지·보수 관리자에게 선로전환기 교체시기에 대한 정보를 제공한다.



(그림 2) 소리 기반 선로전환기 스트레스 탐지 시스템의 전체 구성도

3. 실험 및 결과분석

실험을 위한 소리 데이터는 대전광역시 유성구에 위치한 ㈜세화 연구소에서 마이크(Shure SM137)를 이용하여 소리를 수집하였다. 소리는 선로전환기의 정중앙에서 수집하였으며, 기상상황은 약한 바람이 부는 0~6℃의 환경이었다(그림 3 참조). 스트레스가 쌓인 상황을 인위적으로 만들기 위하여 얼음이 낀 상황과 자갈이 낀 상황을 모의 실험하였고, 스트레스가 해소된 상황을 위하여 윤활유를 사용하여(그림 4 참조) 데이터를 수집하였다.

(그림 3) 선로전환기의 소리 수집 환경

(그림 4) 얼음이 낀 상황(좌), 윤활유를 칠한 상황(우)

실험에 사용한 데이터는, 스트레스가 없는 데이터 100개(윤활유를 칠한 상황), 스트레스가 쌓인 데이터 200개(얼음이 낀 상황 100개, 자갈이 낀 상황 100개) 총 300개이다. 실험 성능 측정을 위한 지표로는 SDR(Stress Detection Rate : 스트레스 상황 탐지율), FPR(False Positive Rate : 스트레스가 없는 소리가 스트레스가 있다고 오탐지된 비율), FNR(False Negative Rate : 스트레스가 있는 소리가 스트레스가 없는 소리로 오탐지된 비율)을 사용하였다.

$$SDR=\frac{\sum_{i=1}^{m} T_i}{\sum_{i=1}^{n} I_i},\quad FPR=\frac{\sum_{i=1}^{k} P_i}{\sum_{i=1}^{l} N_i},\quad FNR=\frac{\sum_{i=1}^{n-m} F_i}{\sum_{i=1}^{n} I_i}$$

위 식에서 I는 스트레스가 있는 데이터, T는 스트레스가 있는 데이터를 스트레스가 있다고 탐지한 데이터, N은 스트레스가 없는 데이터, P는 스트레스가 없는 데이터를 스트레스가 있는 상황으로 탐지한 데이터, F는 스트레스가 있는 데이터를 스트레스가 없다고 판단한 데이터를 의미한다.

3.1 특징 추출 및 특징 선택

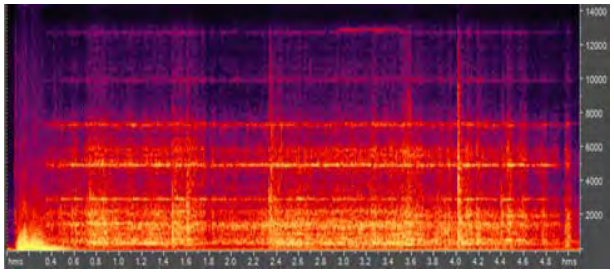
취득한 선로전환기 작동 소리에서 소리 특징을 추출하기 위하여 Praat 6.0.05를 사용하여 Frequency domain 특징 48개를 추출하였다:

· Frequency domain(48개)
Formant F1~F9, PSD (Power Spectral Density) 1~39 (100~4,000Hz 구간에서 100Hz 단위로 추출).

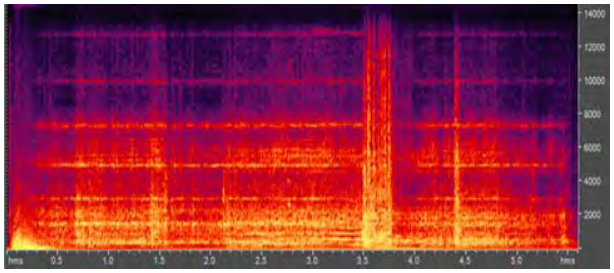
특징 추출 모듈에서 t-test를 이용하여 통계적 유의성 여부를 확인하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

· Frequency domain(31개) : 유의성이 확인된 특징들
F1~F3, F7, F8, PSD2, PSD5, PSD6, PSD8, PSD10~11, PSD13~PSD18, PSD21~PSD31, PSD36, PSD38, PSD39

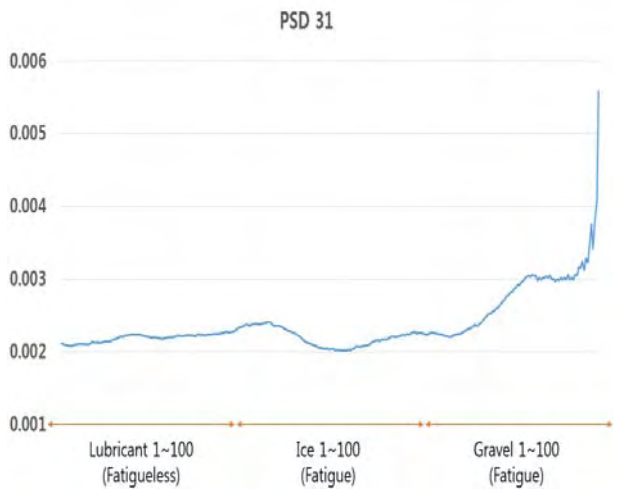
스트레스가 없는 상태인 윤활유를 칠한 소리와 스트레스가 쌓인 상태의 소리특징 스펙트로그램은 그림 5와 같고, 한 가지 예로써 스트레스에 따른 PSD 31 값의 변화 그래프는 그림 6과 같다.



(a) 스트레스가 없는 스펙트로그램(윤활유를 칠한 소리)



(b) 스트레스가 쌓인 스펙트로그램(자갈이 낀 소리)
(그림 5) 수집된 소리의 스펙트로그램들



(그림 6) 스트레스에 따른 PSD 31에서의 power값 변화

그림 5(a)의 스펙트로그램을 보면 5(b)보다 에너지 값이 적음을 확인 할 수 있다. 그리고 그림 6에서는 스트레스에 따라 PSD31의 power 값이 증가함을 확인할 수 있다. 즉, 3,100~3,200Hz 주파수 대역에서 스트레스의 증가 현상을 쉽게 확인할 수 있다. 위 예비 실험 결과를 통해 소리 정보를 통해 스트레스에 따른 선로전환기 소리 분류의 가능성을 확인할 수 있다.

3.2 소리 특징을 이용하여 스트레스 탐지

소리 특징을 이용한 선로전환기의 스트레스 탐지 실험은 스트레스가 없는 소리 100개와 스트레스가 쌓인 소리 200개의 소리데이터로 10-fold cross validation을 실시하였다. SVM의 상대적 중요성을 조정하는 상수(trade-off constant) C 값은 6.0으로 고정하였고, 커널 함수는 PolyKernel을 사용하였다. 실험 결과는 표 1과 같으며, 선로전환기의 스트레스 상황 탐지율(SDR)은 95.0%, FPR과 FNR은 각각 4.0%, 5.8%라는 좋은 결과를 기록하였다.

SDR	FPR	FNR
95.0%	4.0%	5.0%

<표 1> 선로전환기 스트레스 탐지 결과

4. 결론

본 논문에서는 선로전환기의 소리정보를 이용하여, 선로전환기의 스트레스를 탐지하는 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 다양한 소리 특징 정보들을 Frequency domain에서 초기 특징 집합으로 설정한 후, t-test를 이용하여 유의성을 확인하였다. 그리고 스트레스가 쌓인 소리를 탐지하기 위해 SVM을 이용하였다. 실제 테스트용 선로전환기에서 취득한 소리 정보 데이터 셋을 이용하여 본 논문에서 제안하는 소리정보를 이용한 선로전환기의 스트레스 탐지 성능을 실험적으로 검증하였다.

5. 감사의 글

본 연구는 2015년도 중소기업청 기술혁신개발사업 혁신형기업과제(S2312692)의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

참고문헌

[1] Asada, T. and Roberts, C., "Improving the dependability of DC point machines with a novel condition monitoring system," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of rail and rapid transit, vol. 227, no. 4, pp. 322-332, 2013.

[2] Asada, T., Roberts, C., and Koseki, T., "An algorithm for improved performance of railway condition monitoring equipment: Alternating-current point machine case study," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 30, pp. 81-92. 2013.

[3] 이종현, 김용규, 박재영, "센서를 이용한 선로전환기 전환력 측정의 현장 적용성 연구", 전기학회논문지, vol. 64, no. 7, pp. 1130-1136, 2015.

[4] 김철수, 강길현, "운행특성을 고려한 철도차량 감속기의 피로해석", 한국산학기술학회논문지, vol. 12, no. 3, pp. 1085-1090. 2011.

[5] Jin, W., Shi, Z., Siegel, D., Dersin, P., Douziech, C., Pugnaloni, M., and Lee, J., "Development and evaluation of health monitoring techniques for railway point machines," Prognostics and Health Management (PHM), 2015 IEEE Conference on. IEEE, pp. 1-11, 2015.

[6] Vileiniskis, M., Remenyte-Prescott, R., and Rama, D. "A fault detection method for railway point systems. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers," Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 0954409714567487, 2015.

[7] Eker, O., Camci, F., and Kumar, U., "SVM based diagnostics on railway turnouts," International Journal of Performability Engineering, vol. 8, no. 3, pp. 289-398, 2012.