

열간 압연 설비의 고장 예지를 위한 프레임워크 구축

Framework Development for Fault Prediction in Hot Rolling Mill System

손 종 덕* · 양 보 석† · 박 상 혁**

J. D. Son, B. S. Yang and S. H. Park

(2010년 1월 12일 접수 ; 2011년 1월 28일 심사완료)

Key Words : Hot Rolling Mill(열간 압연기), Condition-based Maintenance(상태기반정비), Fault Visualization(결함 가시화), Framework(프레임워크)

ABSTRACT

This paper proposes a framework to predict the mechanical fault of hot rolling mill system (HRMS). The optimum process of HRMS is usually identified by the rotating velocity of working roll. Therefore, observing the velocity of working roll is relevant to early know the HRMS condition. In this paper, we propose the framework which consists of two methods namely spectrum matrix which related to case-based fast Fourier transform(FFT) analysis, and three dimensional condition monitoring based on novel visualization. Validation of the proposed method has been conducted using vibration data acquired from HRMS by accelerometer sensors. The acquired data was also tested by developed software referred as hot rolling mill facility analysis module. The result is plausible and promising, and the developed software will be enhanced to be capable in prediction of remaining useful life of HRMS.

1. 서 론

고도로 자동화된 제철 생산설비에서는 돌발적인 설비 고장이 생산에 지대한 영향을 미치기 때문에, 설비 이상이나 열화 징후를 사전에 신속하게 검지하고 계획적으로 정비할 수 있는 구조가 필수적이다. 또한 국제적인 경쟁력 확보 측면에서 품질과 수율의 향상은 물론이고, 설비의 수명을 최대한으로 연장하며 정비비용을 절감할 것이 요구되고 있다^(1,2).

예지진단(prognosis)은 결함이 진행되고 있는 하위 시스템의 잔여유용수명을 정확하게 예측하는 기술이다⁽³⁾. 가장 널리 사용되는 개념은 현재의 설비

상태나 과거의 운전이력을 고려하여 고장이 발생되기 전까지 가용시간이 얼마나 남았는지를 예측하는 것이다⁽⁴⁾. 특히 중요 핵심설비에서 결함이나 고장 발생이 치명적인 영향을 미칠 때 예지진단은 더욱 요구된다. 예지진단과 더불어 성장하고 있는 결함의 감지와 감지된 결함의 진단을 수반해야 한다. 현재 시점에서 미래의 상태를 예측하고 잔여수명 이전에 발생할 수 있는 결함을 감지하여, 원인을 분석할 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에 체계적인 연구가 필요한 분야이다⁽⁵⁾.

또한 제철 제조설비 등에 이용되는 각종 핵심 기계설비의 상시 건전성감시, 향후 수명예측 및 결함 진행 정도를 파악하고 상태를 파악하기 위한 각 결정 단계(수명예측, 결함감지 및 결함진단)에서 신뢰성 높은 결과를 추론하기 위해 데이터를 융합하는 새로운 형태의 IT 기반의 전문가시스템이며 지식 기반의 서비스기술이다. 이와 같은 지식 기반의 서

† 교신저자; 정회원, 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : bsyang@pknu.ac.kr
Tel : (051)629-6152, Fax : (051)629-6150

* 정회원, 두산중공업 풍력기술개발팀

** 포항산업과학연구원 신뢰성평가실

비스기술은 노후 설비의 교체나 신규 설비 증설의 어려움, 정비비용의 과다, 인건비 상승 등의 문제를 해결하기 위해 현재 상태감시시스템을 보완하거나 대체하기 위해서도 필요하다.

현재 제철 현장에서는 설비의 신뢰성 향상을 목적으로 필수 설비에 대해 상태감시 장비를 구축하여 운용 중에 있으나, 공장 내의 모든 장비를 실시간으로 감시하는 것은 네트워크 효율의 측면에서 무리가 있기 때문에 진동 실효치와 경향 값만이 최종 보고되고 있다. 이러한 과정에서 과도한 정비비용의 손실을 줄이기 위해 기존의 설비진단기법에 대한 전략적인 변화가 필요하다.

이 논문에서는 이와 관련하여 후판 압연설비관리 에 대한 문제점 분석과 이를 해결하기 위한 방안으로 고장예지를 위한 프레임워크를 제안하였다.

2. 설비 분석

압연은 회전하고 있는 롤(roll) 사이에 금속 소재를 통과시켜서 롤의 압력에 의하여 단면적 두께를 감소시켜 판재, 형재 및 봉재를 성형하는 가공방법이며, 단조와 같이 조직이나 성질이 우수한 제품이 얻어진다. 그리고 주조와 단조에 비해 작업이 신속하고 생산능력이 크므로 같은 단면의 제품을 다량 생산하는데 용이하다. 열간 압연은 압연 전 원재료에 해당하는 슬래브(slab)를 압연하기에 적당한 온도인 1,100~1,300 ℃까지 가열한 후 사용자가 원하는 두께와 폭으로 압연하는 과정이다.

후판은 일반적으로 판 두께가 6 mm 이상의 열간 압연장판을 말하며, 선박, 보일러, 압력용기, 교각 등 대형 구조물에 널리 이용된다. 후판 제품은 탄소강이 대부분이지만, 고장력강, 합금강, 스테인리스강 등도 만들어지고 있다.

이 연구에 사용된 후판 공정의 압연시스템은 Fig. 1과 같이 구성된다. 후판의 원재료인 슬래브를 가열로에서 압연하기 좋은 온도로 가열한 후, 디스케일러(descaler)에서 정중상으로 재료를 배치한다. 그리고 마지막으로 메인드라이브(main drive)에서 압연을 수행한다.

2.1 압연 설비 구성(메인 드라이브)

메인 드라이브는 압연공정의 핵심설비로 Fig. 2와

같이 피드 롤(feed roll), 워킹 롤(working roll), 백업 롤(back-up roll) 등으로 구성되어 있다.

2.2 공정 특징

메인 드라이브는 가열된 슬래브를 최종 압연하는 공정으로 Fig. 3은 메인 드라이브 워킹 롤의 속도로서 약 20분 동안 10개의 슬래브 압연을 수행한 결과를 나타내고 있다. y축의 0을 기준으로 “+”는 정방향 “-”는 역방향을 나타내고 있다. 슬래브 한 개당 최종 제품까지 압연 소요시간은 최소 1분에서 최대 2분 30초정도 소요되며, 압연은 최저 7회에서 13회까지 정·역방향으로 수행한다.

메인 드라이브의 한 주기(정·역방향)의 압연에 대한 속도별 설비의 작동순서를 Fig. 4에 나타내었으며, 자세한 순서는 다음과 같다.

- 공정 ① : 정지
- 공정 ② : 정방향 일정 속도 유지
- 공정 ③ : 정방향 압연 수행
- 공정 ④ : 정방향 일정 속도 유지 및 감속

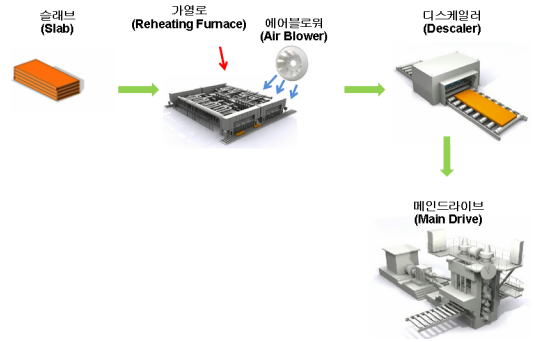


Fig. 1 Hot rolling mill system

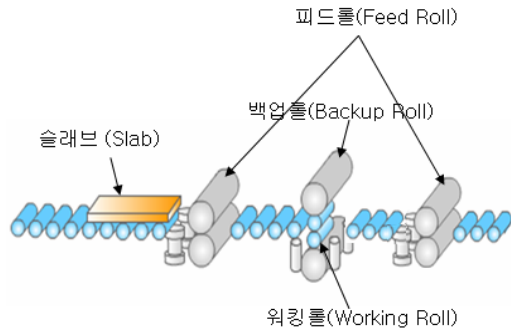


Fig. 2 Configuration of hot rolling machine

- 공정 ⑤ : 정지
- 공정 ⑥ : 역방향 일정 속도 유지
- 공정 ⑦ : 역방향 압연 수행
- 공정 ⑧ : 압연 종료 및 감속

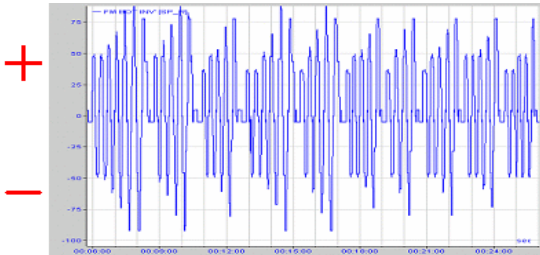


Fig. 3 Velocity signal of main drive

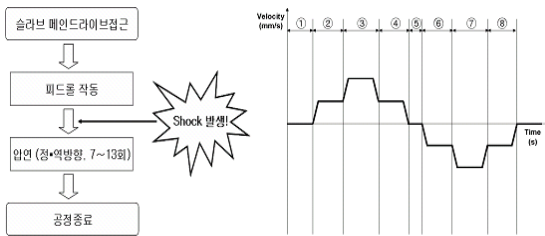


Fig. 4 The process of main drive

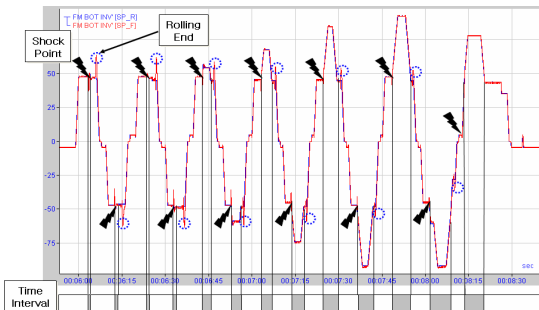


Fig. 5 Velocity analysis of main drive

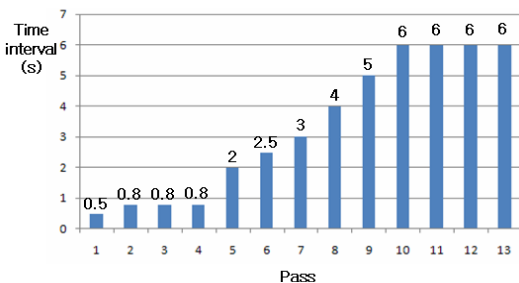


Fig. 6 Rolling time interval of each pass

공정 ②~③과 공정 ⑥~⑦ 사이는 슬래브가 메인 드라이브 근처까지 접근하면 워킹 롤에 잘 맞물릴 수 있도록 피드 롤이 먼저 일정 속도로 작동하게 된다. 그리고 슬래브가 피드 롤의 가속 때문에 메인 드라이브의 워킹 롤에 부딪치게 되어 큰 충격이 발생하게 되며, 이때 충격에 의한 가속도 값이 크기 때문에 상태감시 기준을 초과하게 되어, 설비 관리를 위한 데이터에 적합하지 않은 과도응답 특성이 나타나게 된다.

슬래브 1개의 압연 공정에 대한 속도 신호가 항상 일정한 것은 아니지만, 하나의 슬래브에 대해 시작부터 종료까지 메인 드라이브의 속도신호를 확대해보면 Fig. 5와 같이 나타난다. 인버터 동기속도 신호를 실제 계측한 속도 신호가 잘 추적하고 있으며, 슬래브가 워킹 롤에 접근할 때의 충격 지점을 화살표(▲)로 나타내었다.

Fig. 6은 총 13회의 압연을 수행한 결과로 신호의 특징은 압연 횟수가 증가할수록 압연 시간간격(time interval)도 증가한다는 것이다.

Fig. 6의 각 압연시간을 비교하여 보면 최저 0.5 초에서 최대 6초까지 압연시간이 변화함을 알 수가 있다. 이는 압연 횟수가 증가할 때마다 슬래브의 두께가 얇아지고, 길이 방향으로 늘어나므로 압연 소요시간이 길어지기 때문이다.

롤을 구동하는 전동기의 결합 진단을 위해서는 무부하 조건에서는 결합신호를 찾기가 어렵고, 부하 조건과 정속 구간이 가장 좋은 것으로 알려져 있다. 메인 드라이브의 신호분석 결과, 정속구간이면서 신호 품질이 일정하다고 생각되는 최적 구간은 최종 압연일 때이며, 이를 검증하기위해 장비로 측정한 데이터 취득과 분석 결과를 이하에 나타내었다.

3. 데이터 취득

Fig. 7의 Pt.1~Pt.5와 같이 메인 드라이브에는 총 5개의 가속도계가 수직방향으로 부착되어 있으며, 상부(top), 하부(bottom)의 동기전동기 베어링 하우스 양단 (drive, non-drive end)과 하측 전동기 커플링 하우스에 하나씩 부착되어 있다.

가속도계는 AS062(B&K사)를 사용했으며, Table 1과 같이 10 kHz까지 사용이 가능하다. 그리고 센서의 내 충격 범위는 500 g 이하, 센서 감도는 100 mV/g

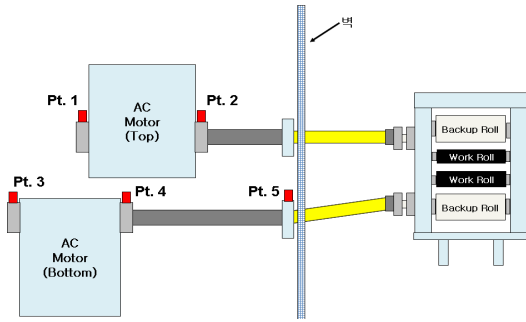


Fig. 7 The position of accelerometer in hot rolling machine(Pt.1~Pt.5)

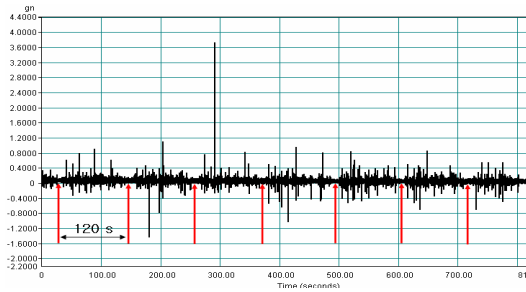


Fig. 8 Acceleration time waveform of main drive

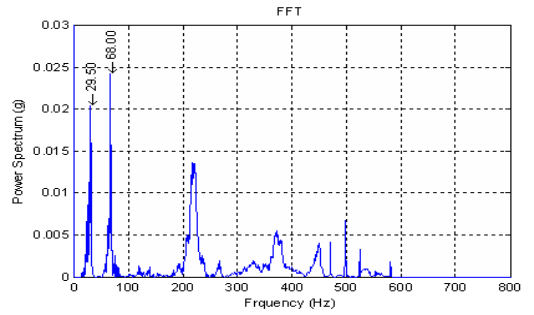
Table 1 Specification of accelerometer

Specification	Contents
Anti-shock	500 g
Sensitivity	100 mV/g
Operating temperature	50~125 ℃
Input range	Input voltage 24 V : 80 g
Frequency range	4 Hz~10 kHz(±5%)

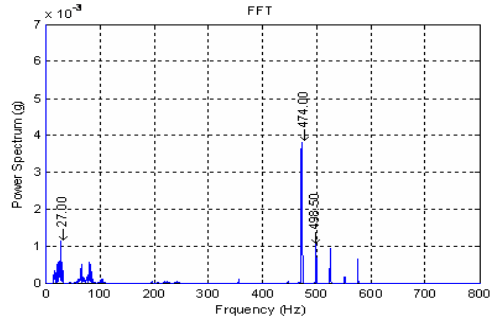
이다. 그리고 데이터 로거(data logger) 샘플링은 2048 Hz, 데이터 수는 4096이다.

Fig. 7에서 압연 롤과 가장 가까운 Pt.5번 위치에서 진동이 가장 크게 나타났으며, Fig. 8은 Fig. 7의 Pt.5 번 위치에서 측정된 가속도의 시간 신호이다. 한 개의 슬라브를 압연하는 시간이 약 120초 정도 소요되며, 6개의 슬라브를 압연할 때의 신호를 나타내었으며, 이때 가속도 최대 피크값은 3.8g로 나타났다.

데이터 취득 결과, Fig. 9와 같이 속도가 변속하는 과도상태 구간에서는 주파수의 변화가 크기 때문에 신호 분석이 어려웠으며, 정상상태 구간에서는 주파수가 큰 변화 없이 피크 값의 구별이 용이하였다.



(a) Transient signal



(b) Steady-state signal

Fig. 9 Acceleration spectrum of main drive

이는 기계 결함에 대한 이상 징후가 발생하였을 때, 정상 상태의 데이터베이스로 구축이 가능하며, 상태 감시와 결함진단을 수행할 수 있는 참조 데이터로 활용이 가능함을 의미한다.

지금까지 데이터 분석은 열간압연 공정상에서 최적의 가속도 데이터를 추출할 수 있었음을 의미하며, 이 데이터를 이용하여 고장 예지를 위한 프레임워크에 활용이 가능하다.

4. 프레임워크 제안

프레임워크의 제안에 있어서 가장 큰 문제는 설비의 운전 상태를 결정하는 것이다. 그 중 하나는 메인 드라이브에서 열간압연시스템의 제어로 인해, 슬래브가 처리되는 동안 재료 특성이 변하고 많은 노이즈가 발생하게 된다. 이때 감지된 신호는 일부 비선형적이고 불안정한 특징을 보여준다.

또 다른 하나는 설비의 성능 저하를 나타내는 명확한 결함 신호를 수집하기 어렵다는 점이다. 제한된 정보를 바탕으로 어떻게 유효한 특징을 추출하여 설비의 상태를 어떻게 평가할 것인지가 문제의

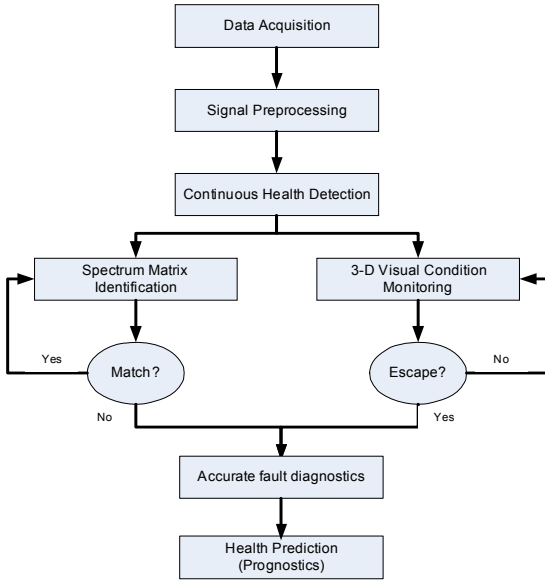


Fig. 10 Flowchart of proposed framework

핵심이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해, 이 장에서는 결합주파수행렬 보조시스템과 3차원 시각적 상태감시 보조시스템을 제안한다. 이들은 각각 사례기반(case-based)의 협대역 스펙트럼 분석과 특징기반의 3차원 시각적 상태감시방법을 기반으로 하며, 설비의 효과적인 상태감시뿐만 아니라 일부 결함진단도 수행할 수 있다(Fig. 10 참조).

4.1 결합주파수행렬 보조시스템

주파수 스펙트럼 분석은 일반적으로 설비의 건강 상태와 관련하여 널리 이용되어 왔으며, 효율적인 결합 스펙트럼 정보를 어떻게 찾을 것인가가 주요 고려사항이다. 제안된 스펙트럼 행렬 보조시스템을 Fig. 11에서 나타낸다. 먼저 정상상태의 원 데이터를 취득한다. 그리고 노이즈의 영향을 줄이기 위해, 평균화를 실시하고, Fig. 9(b)의 같이 주파수 변환을 수행한 후 이를 협대역으로 나눈다. 다음으로 협대역의 스펙트럼을 조사하고, 측정된 여러 슬래브의 협대역 주파수의 몇 개의 스펙트럼 크기를 영역(0, 1) 내에서 식(1)과 같이 정규화 한다.

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

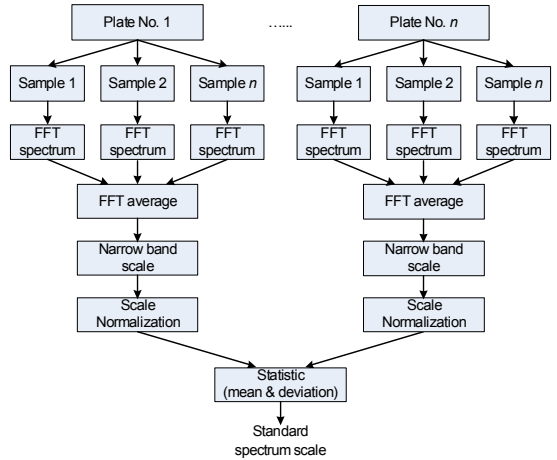


Fig. 11 Flowchart of spectrum matrix subsystem

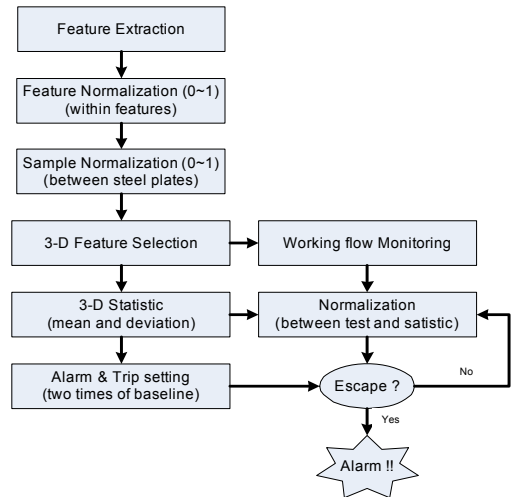


Fig. 12 Flowchart of purposed 3-D visual monitoring subsystem

여기서, x_{\min} 과 x_{\max} 는 원래 스펙트럼행렬에서 최소치와 최대치이고, x_i 와 y_i 는 원래의 값과 변환된 값을 나타낸다.

마지막으로 협대역의 스케일은 정상운전 상태에서 정규화된 값을 통계적 방법(표준편차, 평균 등)으로 계산한다.

4.2 3차원 시각 상태감시 보조시스템

물리적 작동현상이 복잡한 메인 드라이브에 대해서는 Fig. 12에 나타내는 3차원의 시각적 상태감시 전략을 제안한다.

이 시스템에서 시간 영역, 주파수 영역, 시간-주파수 영역(wavelet 영역)과 같은 다양한 영역에서 특징들을 추출한다. 동등한 스케일에서 다른 특징들을 추정 및 비교하기 위해 첫 번째 정규화 과정은 [0, 1]의 범위에서 특징 행렬을 정규화 한다. 정규화 과정은 설비가 정상상태의 동일한 슬래브에서 추출된 신호에서 유사한 재료 특성을 가지는 슬래브들로부터 취득된 데이터가 사용된다. 그리고 통계적 처리가 수행된다.

시각적 3차원 상태감시를 위해서는 설비 상태를 대표하여 표현할 수 있는 3개의 특징이 필요하다. 이를 위해 individual feature extraction(IFE) 특징 선택 과정⁽¹⁰⁾이 사용된다. 계산된 특징 값들 중에서 특징 값들 사이의 거리를 계산하여 같은 군집의 특징들 간의 거리가 가장 짧고 서로 다른 군집간의 거리가 가장 먼 특징을 선택할 수 있게 되어 있다.

여기서 특징 값들의 거리는 통계적 상태의 상이함을 나타내는 척도이고, 군집은 설비의 상태를 나타낸다. 즉, 설비의 상태가 일정하다면 계산된 특징 값의 분포가 일정 영역에서 수렴하게 될 것이고, 설비의 상태가 다르게 되면 앞의 일정 영역에서 벗어난 영역에서 수렴하게 될 것이다. 이러한 특징 영역에서의 군집간 거리는 설비의 상태를 판단하는 기준이 된다.

평균 및 표준편차는 선택된 3개의 특징에 의해 계산된다. 그 결과는 운전 설비의 경보레벨을 나타내는 3차원 구(sphere)로 구성할 수 있다. 구를 이용하여 설비 상태를 나타내면 일정 영역을 벗어나는

값을 확인함으로써 상태의 상이함을 판단할 수 있고, 3차원 경보레벨(trigger level)이 될 수 있다. 여기서 경보는 특징의 평균에서 표준편차 3배로 설정하며, 이는 추후에 현장 경험에 의해 조절될 수 있다.

4.3 개발 프로그램의 적용

개발된 프로그램은 Fig. 13과 같이 총 5개의 GUI(graphic user interface)로 구성된다. 세부 구성은 메인화면(main), 기계정보입력(machine information), 센서정보입력(sensor information), 주파수분석(FFT analysis), 특징상태감시(feature condition monitoring)의 세부 GUI로 되어있고, 이를 제철 설비의 가속도 데이터를 이용하여 검증하였다.

Fig. 14는 3절에서 취득한 메인드라이브의 가속도

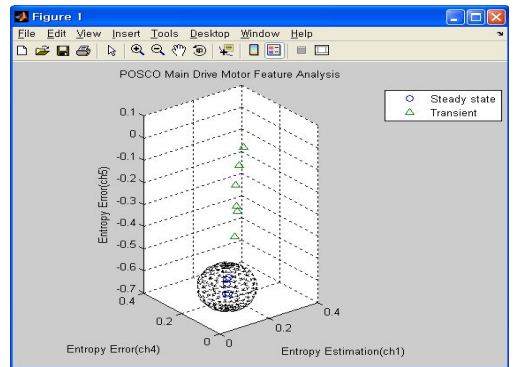


Fig. 14 3-dimensional features plot: best feature calculation

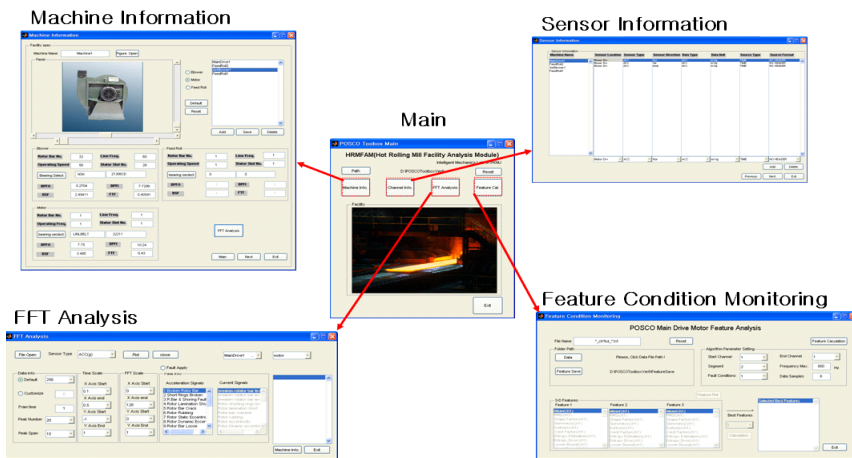


Fig. 13 Screen capture of proposed AMHRMS(analysis module of hot rolling mill system)

데이터를 이용한 3차원 상태감시를 나타내고 있으며, 3차원 구로서 정보상태를 나타내고 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 열간압연 설비의 고장예지를 위한 프레임워크를 제안하였다. 먼저 열간압연 설비의 상태감시를 위한 최적화된 공정을 규명하기 위해, 메인 드라이브의 가속도 데이터를 취득하고 속도별 경향 분석 및 공정을 검토하였다. 이를 바탕으로 상태감시 및 진단 프레임워크를 제안하기 위해, 결합 사례별 고장모드분석을 통하여 주파수 행렬기반 결합분석기법 및 시각적 3차원 상태감시기법을 제안하고, 열간 압연 설비 분석모듈(AMHRMS)을 개발하였다.

이 모듈은 기계정보, 센서정보, 주파수 분석 및 특징계산이 가능한 GUI기반 프로그램으로 주파수 행렬, 베어링 데이터베이스를 포함하고 있다. 이러한 상태기반의 의사결정시스템은 결합주파수 행렬 보조시스템과 같이 사례기반의 주파수 분석기법과 더불어 3차원 특징기반의 향상된 프레임워크를 가지고 있으므로 설비를 진단하는데 우수하다고 할 수 있다. 그리고 설비 상태에 따라 최적의 정비시기를 결정할 수 있으므로 가동률 향상과 생산손실을 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 과제로는 압연설비의 현장 데이터를 이용하여 잔여유용수명을 평가하고, 설비의 상태감시 정보 전송 단계에서 현재의 실효값과 경향치 값과 더불어 진단 결과를 함께 전송함으로써 보다 설비의 정비 상태를 보다 정확히 평가하여 설비 담당자에게 유용한 정보를 제공하는 것이 필요하다.

후 기

이 논문은 BK21 사업과 포항산업과학연구원의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Cowling, P., 2003, A Flexible Decision Support System for Steel Hot Rolling Mill Scheduling, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 45, No. 2, pp. 307~321.

(2) Manabu, K. and Yoshiaki, N., 2008, Data-based Process Monitoring, Process Control, and Quality Improvement: Recent Developments and Applications in Steel Industry, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 32, No. 1-2, pp. 12~24.

(3) Heng, A., Zhang, S., Tan, A. C. C. and Mathew, J., 2009, Rotating Machinery Prognostics: State of the Art, Challenges and Opportunities, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, No. 3, pp. 724~739.

(4) Tran, V. T. and Yang, B. S., 2008, Fault Diagnosis of Induction Motor Based on Decision Trees and Adaptive Neuro-fuzzy Inference, *Expert Systems with Application*, Vol. 36, No. 2, pp. 1840~1849.

(5) Jardine, A. K. S., Lin, D. and Banjevic, D., 2006, A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-based Maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, No. 7, pp. 1483~1510.

(6) Al-Najjar, B., 2000, Accuracy, Effectiveness and Improvement of Vibration-based Maintenance in Paper Mills: Case Studies, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 229, No. 2, pp. 389~410.

(7) Deshpande, V. S. and Modak, J. P., 2003, Maintenance Strategy for Tilting Table of Rolling Mill Based on Reliability Considerations, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 80, No. 1, pp. 1~18.

(8) McElroy, L., Bao, J., Yang, R. Y. and Yu, A. B., 2009, A Soft-sensor Approach to Flow Regime Detection for Milling Processes, *Power Technology*, Vol. 188, No. 3, pp. 234~241.

(9) Singh, G. R. P., Paul, A. K., Chaterjee, A. K., Ganesh, P. S. S. and Mishra, C., 2009, Improving Equipment Availability and Reliability Through Condition Monitoring at Cold Rolling Mill Complex of Tata Steel, <http://www.reliabilityweb.com>

(10) Yang, B. S., Han, T. and An, J. L., 2004, ART-Kohonen Neural Network for Fault Diagnosis of Rotating Machinery, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, No. 3, pp. 645~657.