

# 정상 압연 구간의 특징을 이용한 판 파단의 상태감시

## Condition Monitoring for Coil Break Using Features of Stationary Rolling Region

오 준 석\*, 양 승 옥\*, 심 민 찬\*, 와휴 세사렌드라\*, 양 보 석†, 이 원 호\*\*  
J. S. Oh, S. W. Yang, M. C. Shim, W. Caesarendra, B. S. Yang and W. H. Lee

(2009년 8월 4일 접수 ; 2009년 11월 26일 심사완료)

**Key Words** : Tandem Rolling Mill(다단 압연기), Condition Monitoring(상태감시), Coil Break(판 파단)

### ABSTRACT

Due to the international competition and global pressure, the roll speed is increased. However, higher speeds increase the power density in the process as well as the plant's potential to react with vibrations. Under certain operating conditions, vibrations may occur, which again cause chattermarks, strip rupture or coil break fault. The appropriate condition monitoring is needed to improve product quality and availability. The aim of condition monitoring is to reduce maintenance costs, increase productivity and improve product quality. This paper proposes a condition monitoring tool designed for the classification of coil break fault. This method is used to cold rolling mill for faults monitoring based on vibration and motor current signals. The results show that the performance of classification has high accuracy based on experimental work.

### 1. 서 론

냉간 압연기(cold rolling mill)는 금속소재를 상온에서 회전롤(roll) 사이로 통과시켜 얇은 박판을 양산하는 데 사용되며, 판 두께의 정밀도 및 공차가 엄격한 박판의 압연에는 다단 냉간압연기가 사용된다. 각 압연기의 압하량(壓下量)이나 속도를 자동제어 하여 정밀도가 높은 양질의 판을 고속으로 제조한다.

단일 스탠드로 구성되는 단단 압연은 상대적으로 제어가 용이하나 감시대상이 한정되어 신호를 분석하고 상태를 판단할 때 제한된 범위를 제시하는 반면, 다단(multi-stand) 압연은 제어가 어렵고 각 단

들의 신호의 상호연관성도 복잡하며 결함이 발생한 스탠드가 다른 스탠드에도 영향을 미치므로 상태감시가 매우 어렵다.

압연설비의 상태감시는 주로 시간신호나 주파수 신호를 이용하는 경우가 많고<sup>(1,2)</sup> 채터(chatter) 진동과 같이 특정 영역으로 제한된 경우에 대해서만 결함분석이나 상태감시가 이루어지고 있다<sup>(3-5)</sup>.

압연설비에 대한 상태감시는 다양한 측면에서 일반적으로 적용되지 못하고 있으며, 산업적인 중요성을 고려할 때 압연설비와 제품 품질의 상태감시기술에 대한 다각적인 연구가 필요하다.

이 연구에서는 냉간 압연기에서 발생하는 결함 중 약 40%를 차지하는 판 파단(coil break) 결함을 대상으로 정속 구간에서 여러 종류의 센서로부터 취득되는 시간신호의 특징(feature)<sup>(6)</sup>을 기반으로 고밀도 신호의 차원을 줄여 효율적으로 압연기의 상태감시 및 결함진단이 가능하도록 하는 방법을 제안하고, 현장 설비의 이력 데이터를 이용하여 그 성

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

\* 부경대학교 대학원 메카트로닉스

\*\* (주)포스코 기술연구원

능을 검증하였다.

## 2. 냉간 압연기

Fig. 1은 5개의 스탠드로 구성된 6단 냉간 압연기의 개략적인 구성을 나타낸다. 금속소재는 왼쪽으로부터 유입되며, 5개의 스탠드를 연속적으로 통과하면서 원하는 두께의 박판을 생산한다. 여기서 6단은 스트립을 중심으로 상하 작업 롤(work roll)과 보강 롤(backup roll)을 의미하며, 상부와 하부는 각각의 롤에 연결된 전동기에 의해 구동되며 속도가 제어된다.

Table 1에 보이듯이 압연기에서 발생하는 결함은 다양하고 발생 빈도가 비교적 높은 것을 알 수 있다. 특히 판 과단은 발생빈도가 매우 높고 다른 결함에 비해 설비와 품질에 미치는 영향이 크다. 판 과단은 가속과 정속구간에서 발생할 수 있으며, 특히 정속구간에서 발생하는 판 과단<sup>(7)</sup>은 가속구간에서 발생하는 판 과단보다 정비가 까다롭고 그 만큼

많은 시간이 소비되어 막대한 생산손실을 초래한다.

이 때문에 결함을 조기에 검지하기 위한 상태감시시스템의 도입이 매우 중요하다.

또한 강판(strip)의 폭이 제한되어 있으므로, Fig. 2와 같이 1번 스탠드에서 5번 스탠드로 갈수록 강판 길이가 점차 길어지게 되고, 이는 스탠드의 속도 증가와 이에 따른 물리적 상태가 다름을 의미한다.

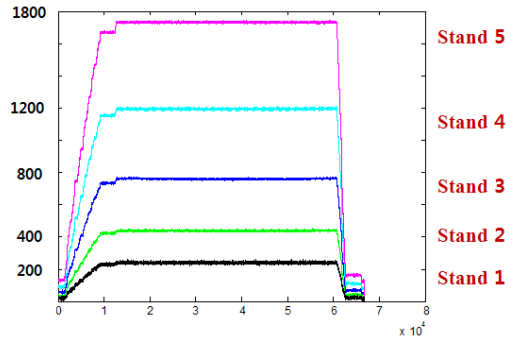


Fig. 2 Motor speed of each stand(m/min)

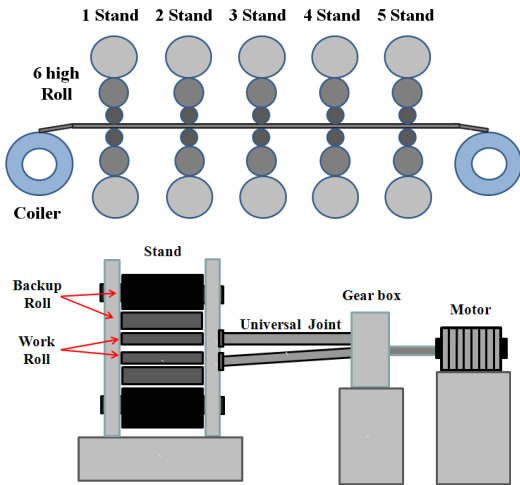
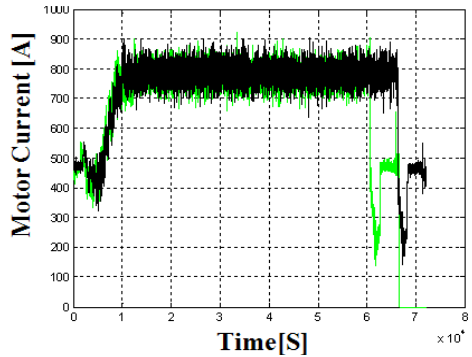


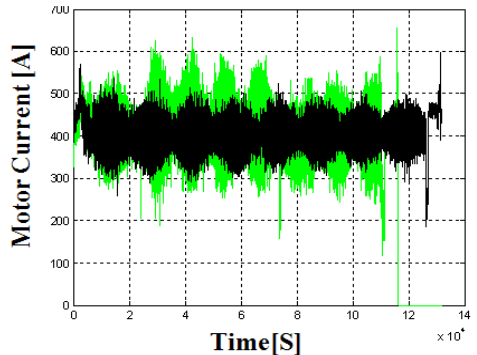
Fig. 1 Cold rolling mill with 5 stands

Table 1 Type of fault frequency

Date	Number of fault events			
	Coil break	Welding point	W/R 2ST replace	Other
2008. 06	7	18	10	6
2008. 12	30	6	20	7
2009. 02	28	2	19	7



(a) Normal condition



(b) Fault condition

Fig. 3 Motor current signal at No. 4 stand

압연기에는 제품과 설비의 상태를 확인하기 위해 롤의 속도 및 힘, 장력, 판 두께 편차, 진동, 전동기 전류 등의 다양한 신호가 측정되고 있다. 이 논문에서는 결합 진단에 용이한 진동과 전류신호를 이용하여, 결합 파라미터로 설정하고 특징기반의 상태감시를 수행하였다. Fig. 3은 일예로 4번 스탠드에서 측정된 전류신호를 나타낸다.

기본적으로 압연기의 경우, 판 두께와 종류에 따라 가해지는 압하중이 달라지고 이는 전동기에서 소비되는 전류 크기에 변화를 가져오게 된다. 또한 각 스탠드는 압연두께의 변화로 인해 점차 압하중이 감소하는 특성을 지니고 있다. 정상적인 압연의 경우, 전동기에서 소비되는 전류는 일정하며 Fig. 3(a)와 같이 안정적인 곡선을 그리게 된다. 하지만 압연 판 파단이 발생하는 경우, 롤이 미끄러지거나 지속적으로 압하중을 가하지 못하는 상태가 되므로 일시적으로 전류 크기에 변화를 일으킬 뿐만 아니라 Fig. 3(b)과 같이 변동(fluctuation) 현상을 동반하는 경우가 많다. 그러므로 단순히 수치의 크기에만 의존하여 결합이 발생하였다고 판단할 수 없고 Fig. 3과 같이 신호의 변동 현상을 함께 고려해야 한다.

### 3. 상태감시 방법의 제안

이 연구에서 제안하는 특징기반의 상태감시과정을 Fig. 4에 개략적으로 나타낸다. 제안된 상태감시 방법의 절차를 요약하면 다음과 같다.

**Step 1(데이터 취득):** 현장의 대상 압연설비로부터 측정된 신호 중 Fig. 5와 같이 정상상태 정속구간의 구동 전동기 고정자의 전류신호와 롤 하부의 진동신호를 취득한다.

**Step 2(특징 계산):** 취득된 전류신호와 진동신호로부터 Table 2에 나타난 22개 특징들을 계산한다.

**Step 3(1단계 특징선택):** 계산된 특징들로부터 제시된 기준에 따라 특징들을 선택하여 1단계로 특징공간의 차원을 축소한다.

**Step 4(2단계 특징선택):** 1단계 특징선택과정에서 선택된 9개의 특징 값으로 구성할 수 있는 모든 특징공간을 구성하여 특징공간행렬을 구성하고 정상과 결합의 특징값 거리가 가장 큰 값만을 추출하여 특징공간의 차원을 3차원(3D)으로 표시한다.

### 3.1 특징(features)

정상상태 데이터로부터 모든 단에 일치하는 정속 구간을 정의하고 정속구간에 대해 데이터를 10개의 데이터 집합으로 분할하였다. 진동은 시간에 따른 진동 진폭의 변화를 측정하며 측정된 시간신호를

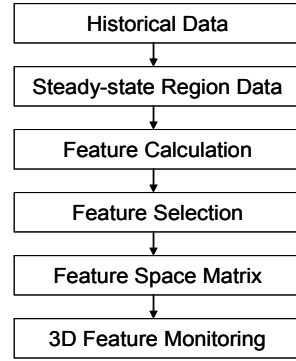


Fig. 4 Procedure of 3D feature-based monitoring

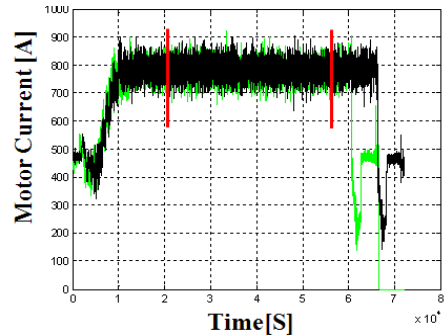


Fig. 5 Definition of steady-state region

Table 2 Used features for feature calculation

Domain	Features
Time (7)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mean</li> <li>• RMS</li> <li>• Standard deviation</li> <li>• Skewness</li> <li>• Kurtosis</li> <li>• Shape factor</li> <li>• Crest factor</li> </ul>
Frequency (5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frequency</li> <li>• Mean square frequency</li> <li>• Root mean square frequency</li> <li>• Variance frequency</li> <li>• Root variance frequency</li> </ul>
Entropy (10)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entropy estimation</li> <li>• Entropy estimation error</li> <li>• Histogram lower bound</li> <li>• Histogram upper bound</li> <li>• Auto-regression coefficients (6)</li> </ul>

기반으로 신호처리기법을 통해 설비 상태에 따른 진동 특징을 계산할 수 있다. 이 연구에서는 특징 값<sup>(8-10)</sup> 계산을 통해 판단하기 어려운 시간신호에서 특징 값 기반으로 차원을 이동하도록 한다. 사용된 특징의 종류는 Table 2와 같다.

### 3.2 1단계 차원 축소

Fig. 6의 x축은 계산된 특징 값에 따라 스탠드 1~5까지 순차적으로 나열된 개수를 나타내고, y축은 계산된 특징 값으로 각 특징을 정규화 하여 0~1 사이의 값으로 표현하였다. 결함 전후의 특징 값을 2

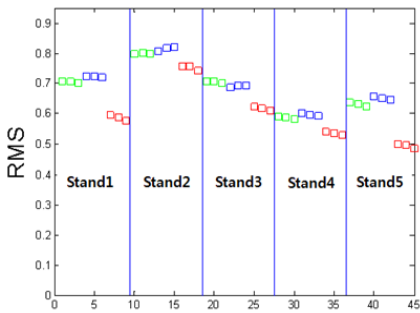


Fig. 6 2D feature plot

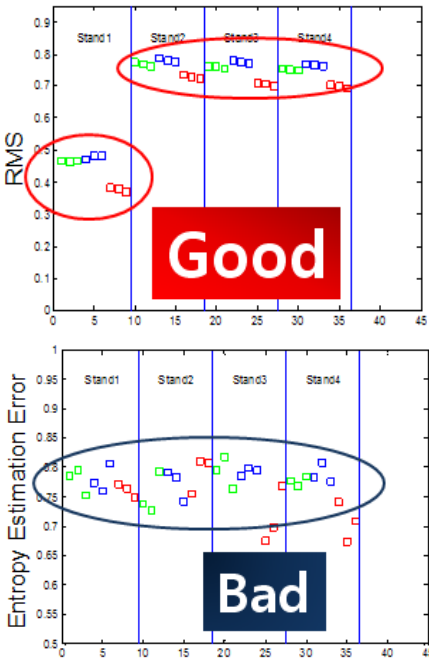


Fig. 7 2D feature clustering

차원(2D) 공간에 순차적으로 나열하면 Fig. 6을 얻을 수 있는데 이러한 과정은 특징이 어떠한 추이를 보이는지 육안으로 확인이 가능하고 이를 통해 상태를 잘 반영하는 특징과 그렇지 못한 특징을 1차적으로 걸러내어 차원을 줄이는 효과가 있다.

계산된 특징 값을 기반으로 1단계 차원을 축소한다. 차원 축소에는 다음과 같은 기준을 이용하였다.

- 동일한 특징량은 시간에 따라 변하지 않고 일정한 값이어야 한다.
- 서로 다른 상태의 특징량 사이에는 뚜렷한 구별이 있어야 한다.
- Fig. 7의 좌측 그림과 같이 특징 값들 사이에 적 절한 군집(clustering)이 이루어져야 한다.

위에서 제시된 기준을 토대로 Fig. 8과 같이 각 특징 값에 대해 분포상태를 비교한 결과, Table 2의 22개 특징 값 중에서 유용한 9개의 특징 값(mean, RMS, crest factor, kurtosis, entropy estimation, entropy estimation error, frequency center, root mean square frequency, root variance frequency)으로 차원을 축소하였다.

### 3.3 3차원 특징공간을 이용한 2단계 차원 축소

1단계 차원 축소를 통해 22개 특징 중에서 선택된 9개의 특징 값을 기준으로 특징공간행렬(feature space matrix)을 구성한다. 지금까지는 특징 값을 계산해서 2D 특징공간에서 1차적인 차원을 축소를 수행하였으며, 이 과정에서 선택된 9개의 특징 값으로 형성할 수 있는 특징공간을 모두 구성하여 특징공간행렬을 구성한다. 각 공간에 이력데이터로부터 계산된 특징 값을 3차원(3D) 특징공간<sup>(11-15)</sup>에 다시 한 번 사상시킨다. 이 과정을 통해 1단계 차원 축소에 이어 2단계 차원 축소를 수행하게 된다. 이러한 차원 축소의 목적은 상태의 특징정보를 최대한 확보하면서 압연기의 상태를 효율적으로 나타내는 것이다.

2차원에서는 데이터 표현이 x, y축에 의해 한정되어져 클래스가 앞뒤로 겹쳐있거나 상하로 겹쳐있을 때는 축을 정확히 정의하지 못하면 오히려 클래스를 잘 못 인식할 수도 있다. 즉, 3차원으로 확대함으로써 상하 및 좌우 어느 방향으로 겹치더라도

감시가 가능한 형태가 된다. 또한, 2차원 좌표를 통해 걸러진 특징을 모두 모아도 여전히 각 축에 하

나의 특징만을 보이게 되므로 결함을 판단하기에 상당히 어려움이 따르게 된다. 이를 3차원 공간으로

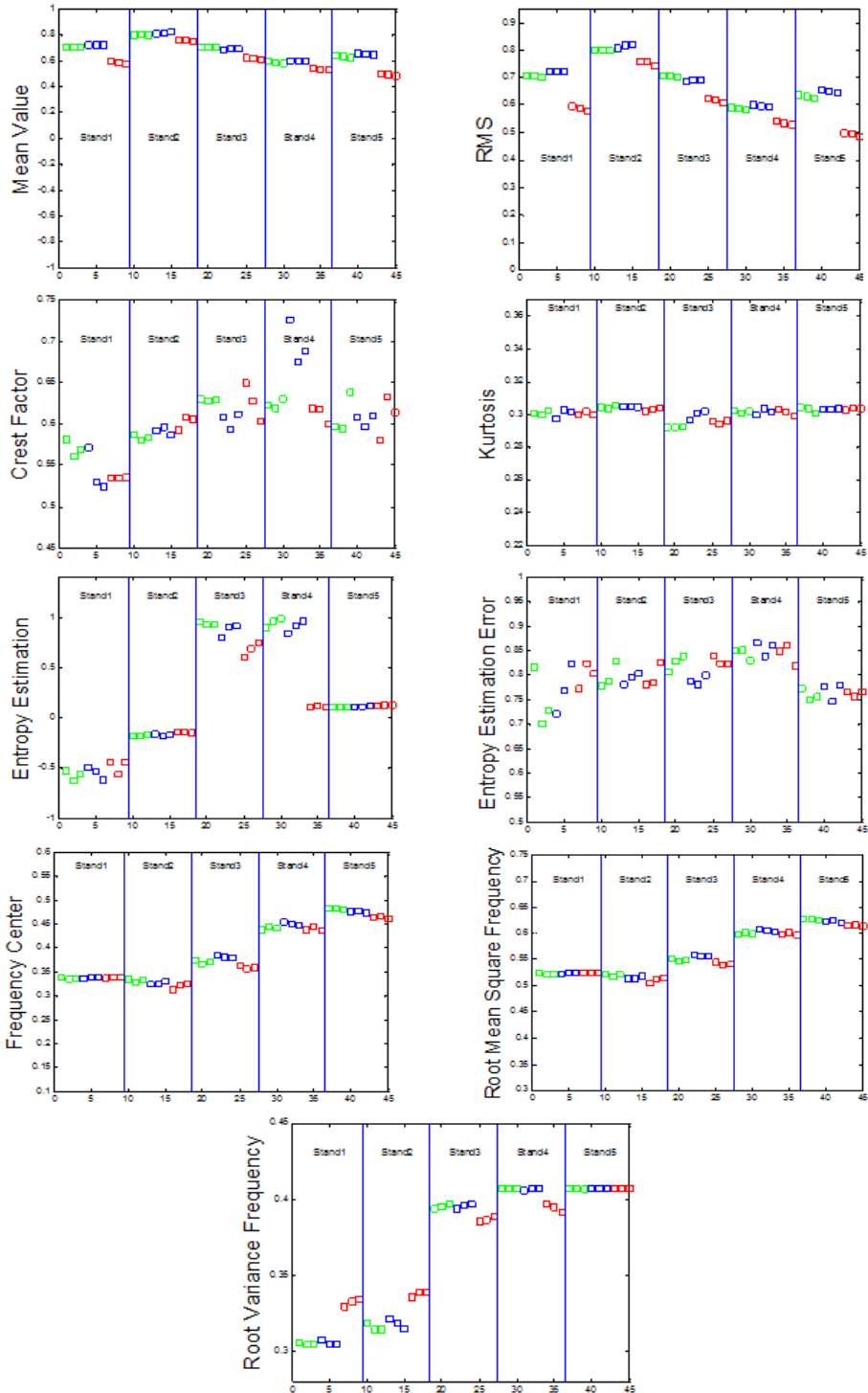
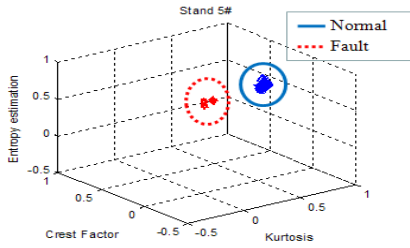
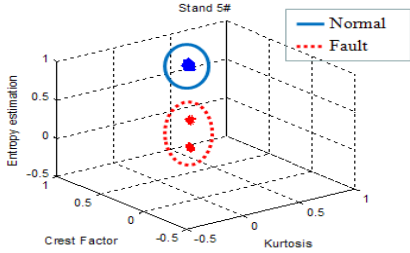


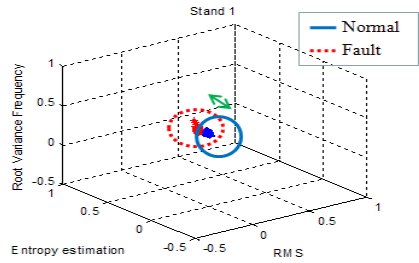
Fig. 8 Results of 2D feature clustering



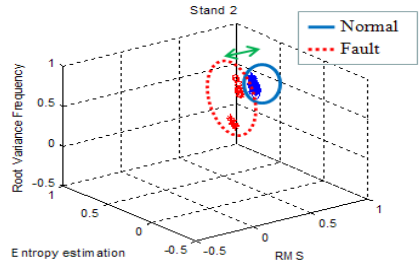
(a) Motor current signal



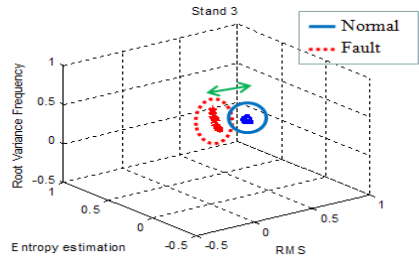
(b) Vibration signal of downside



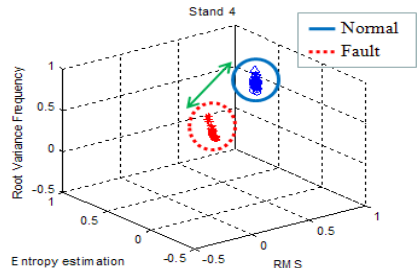
(a) Stand 1



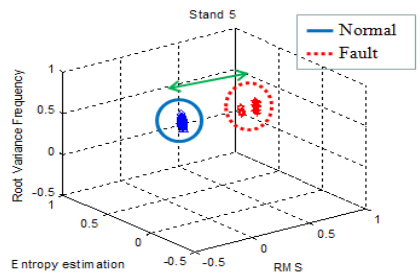
(b) Stand 2



(c) Stand 3

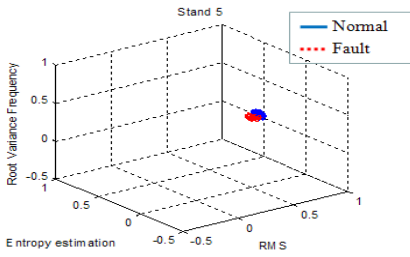


(d) Stand 4

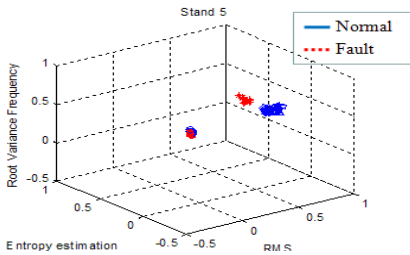


(e) Stand 5

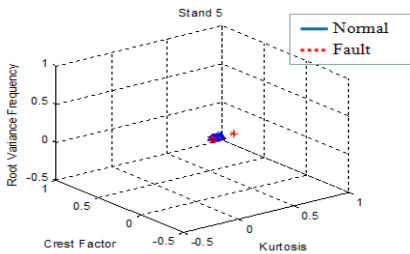
Fig. 9 3D feature monitoring results(continued)



(a) Roll force signal



(b) Thickness deviation signal



(c) Tension force signal

Fig. 10 Results of 3D feature monitoring

Fig. 11 Result of motor current

옳게 되면 각 축을 특징 차원으로 정의하게 되고 하나의 그림에 3개의 특징을 한 번에 표현함으로써 감시해야 되는 특징의 수도 1/3로 줄어들게 된다. 이는 이 연구를 수행하게 된 가장 중요한 목적으로, 실제 압연기에는 상태감시와 운전제어용으로 전동기 전류, 진동, 롤 힘, 두께 편차, 장력 신호를 측정하는 센서가 각 스탠드 별로 중요 위치에 부착되어 있어 약 30개 이상의 신호가 고밀도로 집적된 정보를 이용하여 판단하는 상황이다. 또한, 이렇게 집적된 데이터는 일정 기간이 되면 그냥 버려지게 되어 높은 차원을 가진 의미 없는 데이터가 되고 만다. 이 논문은 이를 해결하고자 통계기반의 특징 값을 이용하여 각 채널 신호의 대표 값을 추출하고 이 특징의 추이를 감시하는 방법을 제안하였다. 이를 통해 관리해야 하는 데이터의 크기를 줄이고 상태감시의 효율성을 높이하고자 한다.  $x$ ,  $y$  및  $z$ 는 앞서 설명한 특징 계산을 통해 얻어진 대표 값이며, 상태감시에 적합한 3개의 대표 값을 Fig. 10 및 11과 같이 한 공간의 각 축으로 정의하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 8은 사용된 여러 신호들에 대한 3D 특징공간 사상의 결과를 나타낸다. 위의 결과로부터 결함 상태감시의 중요한 파라미터로 판단되었던 전동기 전류신호와 진동신호에서 뚜렷이 정상상태와 결함상태가 구별되는 것을 확인할 수 있다. 또한 진동신호에서는 Fig. 1에서 보듯이 압연이 이루어지는 스탠드의 상부 측 롤에서 취득된 진동데이터가 하부 측 롤의 진동 데이터보다 양호한 군집(clustering)을 이루고 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 1에 보이듯이 하부에서 압연되는 스트립 면은 상부에 비해 좀 더 강하게 지지되고 있고, 압연이 되는 스트립의 상부측 진동신호가 좀 더 판의 특성을 잘 나타내는 것으로 생각된다.

또한 롤 힘, 판 두께 편차, 장력 신호도 함께 적용하였으나, 예상대로 결함상태와 정상상태 사이에 차이가 발생하지 않고 모두 같은 영역에 수렴하는 것을 확인하였다. 또한 전류신호는 RMS와 entropy estimation, root variance frequency를 특징으로 하였을 때 분류가 양호하였고, 진동신호는 kurtosis, crest factor, entropy estimation으로 형성된 공간에

서 분류가 잘 이루어졌다.

Fig. 9는 각 스탠드에서 관찰한 전류신호에 대한 3차원 상태감시의 결과이다. Fig. 2에서 언급했듯이 각 스탠드의 물리적 상황이 다르고, Fig. 9에서는 이러한 결과가 반영된 것을 확인할 수 있으며 스탠드 1에서 5로 갈수록 결함과 정상 사이의 단차가 커지는 것이 감시되었다.

3차원 특징공간을 이용함으로써 9개의 특징차원에서 3개의 특징차원으로 한 번 더 차원이 축소되었음을 알 수 있다. 압연기는 스탠드간의 상태가 각각 상이하고 압연 소재가 다양하여 특징공간을 이용한 상태감시는 절대적인 기준을 설정해서 평가하기는 어렵다. 따라서 결함과 정상 간의 상대적인 차극, 특징공간에서의 거리차가 발생하는 것을 감시함으로써 결함을 감지할 수 있음을 확인하였다.

#### 5. 결론

이 연구에서는 압연기에 발생할 수 있는 결함 중에 발생 빈도가 높고 큰 비용 손실을 야기하는 판파단에 대해 정속구간에서의 상태감시를 위한 방법을 제안하고 압연기의 이력 데이터를 이용하여 검증하였다. 이를 바탕으로 특징 값을 계산하고 이들 중 유용한 특징정보를 추출하여 차원을 축소하였으며 3차원 특징공간에서 결함 데이터와 정상 데이터를 시각적으로 분류하였다. 그 결과, 결함의 상태감시에는 전류신호와 진동신호가 결함에 대한 특성을 가장 효과적으로 표현하였으며, 전류신호는 RMS, entropy estimation, root variance frequency가, 진동신호는 kurtosis, crest factor, entropy estimation을 특징으로 선택하였을 때 가장 양호한 분류 결과를 나타내었다. 특히 전류신호의 경우, 각 스탠드에서 단차를 확인한 결과, 전동기 속도가 상대적으로 높은 스탠드 4와 5에서 단차가 가장 컸다. 3차원 특징공간상에서 절대 영역을 분리하여 상태를 구분할 수는 없지만, 연속된 일련의 이력 데이터를 상대적으로 비교하였을 때 보다 양호하게 상태 구분을 할 수 있었다.

#### 후 기

이 연구는 포스코 기술연구원의 연구비 지원과

공동으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Asch, A. and Hohn, W., 1999, "Monitoring System for Roll Stand Drives using Strain Gage Technology," International Federation of Automatic Control: Automation in Mining, Mineral, and Metal Processing, pp. 159~164.
- (2) Cerv, H., Keffler, H., Luckmann, F. and Mackel, J., 1998, "Mill Diagnostic System(MiDaS) - a Monitoring System with Quality and Maintenance - Related Diagnostic Functions," Aluminium, Vol. 74, No. 3, pp. 148~154.
- (3) Donkle, L. B., 1999, "Fifth-octave Chatter Problem Solved Using Vibration Analysis," AISE Steel Technology, Vol. 76, No. 11, pp. 40~45.
- (4) Kimmura, Y., Sodani, Y., Nishiura, N., Ikeuchi, N. and Mihara, Y., 2003, "Analysis of Chatter in Tandem Cold Rolling Mills," ISIJ International, Vol. 43, No. 1, pp. 77~84.
- (5) Shin, N. H., Kang, M. K. and Lim, E. S., 1998, "Prevention of Chatter Mark in Cold Rolling Mill," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, pp. 335~338.
- (6) Han, T., 2002, "Feature Extraction of Vibration Signal for Machinery Condition Monitoring," Master Thesis, Pukyong National University, pp. 8~14.
- (7) Lee, W. H. and Shin, N. H., 2002, "The Prediction Algorithm for Strip Breakage in Tandem Cold Rolling Mill," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, pp. 1079~1084.
- (8) Yang, B. S., Han, T. and Hwang, W. W., 2005, "Application of Multi-class Support Vector Machines for Fault Diagnosis of Rotating Machinery," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 19, No. 3, pp. 845~858.
- (9) An, K. R., 2002, "Failure Diagnosis of Rotating Machinery Using Artificial Neural Networks," PhD Dissertation, Pukyong National University, pp. 74~84.
- (10) Widodo, A. and Yang, B. S., 2007, "Application of Nonlinear Feature Extraction and Support Vector Machines for Fault Diagnosis of Induction Motors," Expert Systems with Applications, Vol. 33, No. 1, pp. 241~250.
- (11) Zhu, Y., Shan, X. and Guo, J., 2005, "Feature Selection Method Based on Variable Similarity in Intrusion Detection System," Microelectronics and Computer, Vol. 22, No. 10, pp. 34~36.
- (12) Subrahmanya, N. and Shin, Y. C., 2008, "Automated Sensor Selection and Fusion for Monitoring and Diagnostics of Plunge Grinding," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 130, No. 3, 031014.
- (13) Widodo, A., Yang, B. S. and Han, T., 2007, "Combination of Independent Component Analysis and Multi-class Support Vector Machines for Fault Diagnosis of Induction Motors," Expert Systems with Applications, Vol. 32, No. 2, pp. 299~312.
- (14) Widodo, A., Kim, E. Y., Son, J. D., Yang, B. S., Tan, C. C., Gu, D. S., Choi, B. K. and Mathew, J., 2009, "Fault Diagnosis of Low Speed Bearing Based on Relevance Vector Machine and Support Vector Machine," Expert Systems with Applications, Vol. 36, No. 3, pp. 7252~7261.
- (15) Hwang, W. W. and Yang, B. S., 2004, "Fault Diagnosis of Rotating Machinery Using Multi-class Support Vector Machines," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 1233~1240.