

디지털 필터를 이용한 단일 스탠드 압연기의 편심 진단 알고리즘

(An Algorithm of Diagnosing Eccentricity In Single Stand Rolling Mill)

전재영* · 김현승* · 이해영**

(Jae-young Jeon · Hyun-seung Kim · Hai-young Lee)

요 약

본 논문에서는 압연공정에서 편심을 검출하고 편심의 원인을 진단할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 설계된 기법은 대부분의 압연공정에 이미 설치되어 있는 로드셀과 타코메타의 출력 신호만을 사용하며, 추가적인 센서를 필요로 하지 않는다. 편심 신호의 검출은 중심주파수가 회전속도에 따라 변화하는 6개의 디지털 대역 통과 필터의 출력을 조합하여 이루어진다. 추출된 편심 관련 데이터로부터 편심의 원인을 진단하는 기능은 적절한 변수를 정의하여 구현되었다. 모의 실험은 세 가지 경우에 대해 행해졌는데, 물의 일부분이 마모된 경우, 회전축이 물의 중심과 일치하지 않는 경우 및 두 가지 원인이 복합된 경우 등이다. 모의 실험 결과는 제안된 알고리즘에 의해 모든 경우에 편심의 진단이 가능함을 보여준다.

Abstract

This paper presents an algorithm of detecting eccentricity signal and diagnosing the cause in rolling process. A designed technique uses only the outputs of load cell and tachometer, which are generally utilized in rolling process, and need not any additional sensors. Detecting signals related to eccentricity is done by combining outputs of 6 digital bandpass filters whose center frequency are varied with roll's rotating frequency. A function of diagnosing the cause of eccentricity from extracted data having eccentricity components is implemented by defining reasonable variables. In order to show validity of an algorithm designed in this paper, simulation was accomplished for three groups. The first is that some portion of roll in the direction of roll circumference is distorted. The second is that rotating axis and roll center is not identical. The third is that composite cause is occurred. Simulation results show that every kind of eccentricity can be diagnosed in terms of algorithm proposed.

1. 서 론

최근에는 압연공정(Rolling process)에서 제조되는 철관의 두께가 0.12[mm] 정도까지 얇아져 두께 제어 성능을 더욱 향상시킬 필요성이 대두되면서 편심(Eccentricity)의 진단 기술이 중요한 문제로 대두되고 있다. 압연공정에서 편심이라는 것은 압연용 롤

*정회원 : 영남대 전기공학과 석사과정

**정회원 : 영남대 전자정보공학부 부교수 · 공박

접수일자 : 2000년 10월 20일

(Roll)이 지속적인 사용으로 인해 마모되어 진원이 되지 못하거나 롤의 중심과 회전축이 일치하지 못하는 문제를 의미하는데, 어떤 경우에도 제조되는 철판의 두께에 롤의 회전 주파수에 비례하는 주기적인 변동을 발생시킨다. 이와 같이 편심에 의해 발생하는 두께의 변동은 대개 간단한 편심제어기능[1]-[6]에 의해 어느 정도까지는 억제되는데, 작업자가 필요할 때 적절한 조치를 취할 수 있게 하려면 온라인 상태에서 항상 편심 문제의 발생 여부를 검출하고 그 원인이 무엇인지를 진단하여 알려줄 수 있는 기능이 필요하다[1].

대개 지금까지 발표된 편심의 검출 및 진단 기법은 압연의 입력단 또는 출력단 소재 두께에 대한 정보나 압연하중에 대한 정보의 주파수 스펙트럼을 구하여 백업롤(Back up roll)의 회전주파수에 비례하는 성분이 나타나는 지를 찾는 것이다[7]-[15]. 그런데 이와 같은 스펙트럼 분석방식들은 롤의 회전속도 변동에 따른 스펙트럼의 변화를 처리하기 곤란한 문제[7]가 있고, 편심의 진단 결과가 편심의 발생 모양을 보여주는 것이 아니라 주파수 영역에서 각 성분별 크기만을 알려주므로 실제 작업자가 판단하기에는 매우 어렵고 불편한 단점이 있다. 최근에는 회전속도의 변동문제를 해결하기 위해 회전속도의 변동이 일정한 범위내일때만 분석용 데이터를 취득하는 방법도 제안되었으나[8], 이는 응용성이 제한되는 문제점이 있다. 또한 보다 정밀한 진단을 위해 압연용 롤을 붙인 키스롤(Kiss-roll) 상태에서 롤의 편심을 측정하여 온라인 진단의 성능을 개선하는 기법도 제안[10]되었지만, 사용하기에 불편한 단점이 있다.

본 논문에서는 추가적인 센서가 필요 없이 대부분의 압연기에 이미 부착되어 사용되고 있는 로드셀과 타코메타의 출력만을 이용하고 회전속도의 변동에 관계없이 온라인 상태에서 항상 편심의 유무를 검출하고 그 원인을 진단할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 또한 편심의 검출 및 진단 결과를 실제 편심이 발생하여 나타나는 모양 그대로 보여줌으로써 작업자가 즉시 어떤 종류의 편심 문제가 발생한 지를 판단할 수 있는 기법을 설계한다. 설계된 알고리즘은 크게 두 가지 부분으로 나누어진다. 첫 번째는 로드셀의 출력인 압연하중과 타코메타의 출력인 회전속도 정보들로부터 압연하중에서 편심에 관련되는 성분을 추출하는 부분이다. 이 기능은 중심주파수가 회

전속도에 따라 연동되는 6개의 디지털 대역 통과 필터의 출력을 합하는 방식으로 구현되었다. 두 번째는 추출된 편심 관련 데이터로부터 편심의 유무와 편심의 원인을 진단하는 부분이다. 이 기능은 편심의 유무와 편심의 원인을 대변할 수 있는 적절한 변수를 제안하여 구현하였다.

제안된 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 모의 실험을 하였다. 모의실험은 롤의 일부가 마모된 경우, 회전축이 롤 중심과 일치하지 않는 경우 및 두 가지 원인이 복합된 경우에 대해 이루어졌다. 모의실험 결과는 설계된 알고리즘을 통해 모든 경우에 편심의 발생 유무 및 편심의 원인에 대한 진단이 잘 이루어짐을 보여 준다.

제2장에서는 편심 진단 알고리즘을 설명하고, 제3장에서는 모의실험 환경과 결과를 소개하며 제4장에서는 결론을 맺는다.

2. 편심 진단 알고리즘

본 논문에서 제안한 편심 진단 알고리즘의 전체 구성을 그림 1에 보인다.

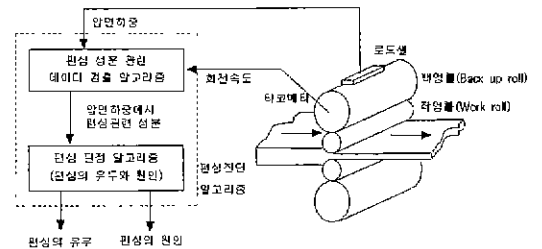


그림 1. 편심 진단 알고리즘의 구성
Fig. 1. A conceptual block diagram of eccentricity diagnosis algorithm

그림 1에서 볼 수 있듯이 본 방식은 추가적인 센서를 필요로 하지 않으며, 이미 대부분의 압연기에 설치되어 활용되고 있는 로드셀과 타코메타의 출력만을 이용한다. 로드셀로부터는 압연하중에 대한 데이터를 얻고, 타코메타에서는 롤의 회전 속도에 관한 데이터를 받는다.

편심의 진단 알고리즘은 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째 부분은 압연하중 데이터 중에서 편심 성분에 관련된 데이터만을 추출하는 기능인데,

압연하중 신호에서 회전 속도의 1배부터 6배에 해당하는 신호 성분은 6개의 대역통과필터(Bandpass filter)를 이용하여 검출한다. 두 번째 부분은 편심을 판정하는 기능으로 첫 번째 부분에서 얻은 편심에 관련된 신호 데이터로부터 편심의 존재 유무와 편심의 원인을 판정한다.

2.1 편심 성분 관련 데이터 검출 알고리즘

로드셀로부터 받은 압연 하중 데이터와 타코메타 출력인 회전속도에 관한 정보로부터 압연기의 편심 성분에 관련된 데이터를 추출하는 알고리즘의 전체 구성을 그림 2에 보인다.

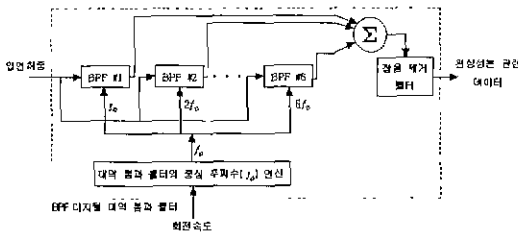


그림 2. 편심 데이터 검출 알고리즘의 구성
Fig. 2. Block diagram of extraction algorithm for eccentricity data

다음에 처리 단계별로 제안된 알고리즘을 설명한다. 여기서 압연하중과 회전속도는 매 샘플링 시간마다 얻게 되며, k번째 시점에서 받은 압연하중과 회전 속도를 각각 $P(k)$ 및 $v(k)$ 로 약속하며, 샘플링 시간은 T_s [sec]로 정의한다.

Step 1: $P(k)$ 와 $v(k)$ 의 입력

k번째 시점에서 측정된 압연하중 $P(k)$ 와 롤의 회전속도 $v(k)$ 를 받는다. $P(k)$ 에는 편심에 관련된 데이터가 포함되어 있다.

Step 2: 분석창의 크기 연산

민저 분석창이란 개념을 도입한다. 실시간으로 편심 여부를 판정하기 위해서는 대략 롤이 1회전하는 동안 취득된 데이터를 가지고 진단하는 것이 적절하다. 따라서 한 번의 진단에 필요한 데이터 개수를 분석창이라 약속하고, 이를 $W(l)$, $l=0,1,2,\dots$ 로 표기한다. 여기서 l은 분석창이 새로 수정되는 시점을 말하며, $W(l)$ 의 의미를 생각하면 초기 설정

값인 $W(0)$ 는 식(1)과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$W(0) = \frac{1}{\text{가동시초기회전주파수 (cycle/sec)}} \div T_s \tag{1}$$

T_s 는 일정한 값이지만 롤의 회전속도는 압연 작업중에 변동할 수 있다. 그런데 롤의 회전 속도가 변동하면 롤의 1회전시 얻어지는 데이터의 갯수가 달라지므로, 진단하는 시점에 적절한 $W(l)$ 은 회전 속도에 따라 변경시켜 주어야 한다.

타코메타의 출력인 $v(k)$ 는 대개 rev/min의 단위로 나오므로, k번째 시점의 롤 회전 주파수 (cycle/sec)를 $f_{rot}(k)$ 라 하면 $f_{rot}(k)$ 는 식(2)와 같다.

$$f_{rot}(k) = \frac{v(k)}{60} \tag{2}$$

또한 회전 주파수가 $f_{rot}(k)$ 일 때 롤의 1회전시 취득되는 데이터 수를 $N(k)$ 라 하면 $N(k)$ 는 식(3)과 같다.

$$N(k) = \frac{1}{f_{rot}(k)} \div T_s \tag{3}$$

그러면 적절한 $W(l)$ 은 평균의 개념을 도입하면 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$W(l) = \frac{\sum_{n=k-W(l)-1}^k N(n)}{W(l-1)} \times \beta, \text{ 단, } k \geq W(0) \tag{4}$$

이해를 돕기 위해 $W(l)$ 의 연산 과정을 그림 3에 보인다. 이 연산은 $N(k)$ 가 $W(l-1)$ 개 만큼 신규로 저장되었을 때마다 한 번씩 행해지며, 이때 다음 번에 사용될 $W(l)$ 이 $W(l-1)$ 개의 $N(k)$ 를 합한 값을 $W(l-1)$ 로 평균하여 계산됨을 의미한다. 또한 여기서 β 는 롤의 회전속도 변동에 따른 $W(l)$ 의 오류를 보정하는 기능인데, 예를 들어 회전 속도가 감소할 때 이전 단계에 가지고 있던

$W(l-1)$ 개의 $N(k)$ 로 분석창의 크기를 계산하면, 분석창은 속도가 감소했을 때 물이 1회전 하는 동안 얻어지는 데이터 수보다 작아지게 되어 적절한 분석창이 되지 못한다. 따라서 이런 문제를 보정하는 방법으로 평균치의 계산식에 $\beta(>1)$ 를 곱한 것이다.

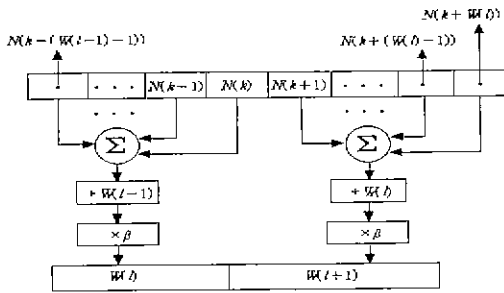


그림 3. $W(l)$ 의 연산과정
Fig. 3. Computing procedure for $W(l)$

Step 3 : 대역 통과 필터의 중심 주파수 계산

압연 하중에 관한 정보인 $P(k)$ 중에 편심에 관한 성분만을 추출하기 위해 본 논문에서는 여러개의 디지털 대역 통과 필터를 사용하므로, 각 대역 통과 필터의 중심 주파수를 결정하여야 한다. 그런데 롤의 회전 속도가 변경되면 $P(k)$ 중의 편심 성분도 같은 속도로 변동하므로 중심주파수를 롤의 회전속도에 맞춰서 바꾸어 줘야 편심 정보를 정밀하게 추출할 수 있다.

k 번째 시점에서 편심 주파수의 1배에 해당하는 신호를 추출하는 디지털 대역 통과 필터의 중심 주파수를 $f_o(k)$ 라 약속하면 식(2)의 결과를 이용하여 $f_o(k)$ 는 원칙적으로 식(5)와 같이 변경되어야 한다.

$$f_o(k) = f_{roll}(k) \tag{5}$$

그러나 $f_o(k)$ 가 식(5)에 의해 선정되면, 롤의 회전속도가 빠르게 변동할 때는 식(5)로 결정된 중심주파수를 갖는 대역 통과 필터가 현재의 편심 정보를 정밀하게 추출하지 못하게 되므로, 회전 속도의 변동 추이를 관찰하여 $f_o(k)$ 를 변경시켜 줄 필요가 있다. 대개 이런 보정 과정은 직선의 식 형태를 사용하므로 $f_o(k)$ 는 식 (5)보다는 이전에 설정되었던 중심

주파수와 현재 측정된 $f_{roll}(k)$ 와의 차이를 이용해 회전 속도의 변동을 미리 예측하는 기능을 추가한 식(6)으로 계산한다. 식(6)은 $W(l)$ 이 변경될 때 마다 계산되며, 여기서 α 는 보정항에 대한 가중치인데 회전 속도의 변동이 크면 α 를 크게하고 변동이 작으면 α 를 작게 선정한다

$$f_o(k) = f_{roll}(k) + \alpha \times (f_{roll}(k) - f_{roll}(k - W(l-1))) \tag{6}$$

Step 4 : 디지털 대역 통과 필터의 연산

디지털 대역 통과 필터는 $P(k)$ 에 포함된 편심 정보를 추출하는 기능을 갖는데, w_o 를 중심 주파수의 각속도 및 B 를 대역폭이라 할 때 식(7)와 같이 전달함수가 $G_{BPF}(s)$ 인 2차 아날로그 Butterworth 형을 Tustin 근사법으로 이산화하여 설계하였으며, 근사된 이산전달함수를 $G_{BPF}(z)$ 라 하면 식(8)과 같다.

$$G_{BPF}(s) = \frac{Bs}{s^2 + Bs + w_o^2} \tag{7}$$

$$G_{BPF}(z) = \frac{B_0(1 - z^{-2})}{1 + A_1z^{-1} + A_2z^{-2}} \tag{8}$$

여기서 $c \triangleq 2/T_s$ 라 하면, A_1, A_2 및 B_0 는

$$A_1 = \frac{2(w_o^2 - c^2)}{w_o^2 + Bc + c^2}, \quad A_2 = \frac{w_o^2 - Bc + c^2}{w_o^2 + Bc + c^2}$$

$$B_0 = \frac{Bc}{w_o^2 + Bc + c^2}$$

와 같이 계산되는 상수들이다.

그런데 편심의 원인에 따라 편심의 영향이 나타나는 모양이 다르므로 여러 유형을 모두 검출하기 위해서는 다수의 대역통과 필터가 필요하다. 본 논문에서는 적절한 진단 성능의 보장과 온라인 활용시 계산 속도를 고려하여 대역 통과 필터의 개수를 6개로 선정하였다. 즉 각 디지털 대역 통과 필터의 출력을 $P_i(k), i=1,2,3,4,5,6$, 라 하면 $P_i(k)$ 는 식 (9)와 같은 차분 방정식으로 연산된다.

$$P_i(k) = B_0P(k) - B_0P(k-2) - A_1P_i(k-1) - A_2P_i(k-2) \quad (9)$$

여기서 각 필터의 중심 주파수를 $f_i(k)$ 라고 하면 Step 3에서 구한 $f_o(k)$ 를 기준으로 하여 $f_1(k) = f_o(k)$ 및 $i=2,3,4,5,6$ 일 때 $f_i(k)$ 는 식(10)으로 계산된다.

$$f_i(k) = if_o(k), \quad i=2,3,4,5,6 \quad (10)$$

각 디지털 대역 통과 필터의 출력인 $P_i(k)$ 는 합산되어, $P(k)$ 에 포함된 편심 정보를 제공하며 이를 $P'(k)$ 라 약속하면 식(11)와 같다.

$$P'(k) = \sum_{i=1}^6 P_i(k) \quad (11)$$

$W(l-1)$ 개의 $P(k)$ 가 모여 졌을 때 한번 수행되는 Step 2와 Step 3과는 달리 이 연산은 매 샘플링 주기마다 행해지게 된다.

Step 5 : 잡음 억제용 필터

$P(k)$ 나 디지털 대역 통과 필터의 출력인 $P_i(k)$, $i=1,2,3,4,5,6$, 에는 잡음이 포함될 수 있으므로 Step 4에서 구해진 $P'(k)$ 를 식(12)와 같이 평균하여 $P(k)$ 에서 추출한 편심관련 성분의 최종값 $P''(k)$ 를 얻는다.

$$P''(k) = \frac{P'(k-2) + P'(k-1) + P'(k)}{3} \quad (12)$$

2.2 편심 판정 알고리즘

편심 판정 알고리즘의 기능은 편심 성분 관련 데이터 검출 알고리즘으로부터 한 분석창($W(l)$) 만큼의 $P'(n)$, $n=1, 2, \dots, W(l)$, 이 구해지면, $W(l)$ 개의 $P'(n)$ 을 가지고 편심의 유무에 대한 판정과 편심의 원인을 진단하는 것이다. 다음에 단계별로 편심 판정 알고리즘을 설명한다

Step 1 : 편심 판정에 사용될 변수의 연산

먼저 $P'(n)$ 의 절대값을 취한 후, $|P'(n)|$, $n=1, 2, \dots, W(l)$,에서 값이 큰 순

서로 10개를 추출하고, 그중 최대값과 최소값을 제외한 8개의 데이터를 $P'_M(m)$, $m=1, 2, \dots, 8$, 이라고 약속하자. 다음에 l 번째 진단 시점에서 $P'_M(m)$ 의 산술 평균을 $P'_{M,ave}(l)$ 이라 하면 $P'_{M,ave}(l)$ 은 식(13)와 같다.

$$P'_{M,ave}(l) = \frac{\sum_{m=1}^8 P'_M(m)}{8} \quad (13)$$

이 $P'_{M,ave}(l)$ 은 한 분석창 내에서 발생한 편심 성분의 최대 크기에 관한 정보를 가진 변수다.

또한 l 번째 진단 시점에서 $|P'(n)|$, $n=1, 2, \dots, W(l)$, 의 산술 평균을 $P'_{ave}(l)$ 라 약속하면 $P'_{ave}(l)$ 은 식 (14)와 같다.

$$P'_{ave}(l) = \frac{\sum_{n=1}^{W(l)} |P'(n)|}{W(l)} \quad (14)$$

그리고 l 번째 진단 시점에서 한 분석창 내에 있는 로드셀 출력 $P(n)$, $n=1, 2, \dots, W(l)$, 의 산술평균을 $P_{ave}(l)$ 이라 정의하면 $P_{ave}(l)$ 은 식 (15)와 같다.

$$P_{ave}(l) = \frac{\sum_{n=1}^{W(l)} P(n)}{W(l)} \quad (15)$$

$P(n)$ 은 $P'(n)$ 과는 달리 항상 $P(n) > 0$ 인 성질을 가지므로 절대값을 취하지 않아도 된다.

Step 2 : 편심 유무의 판정

편심은 그 자체의 크기보다는 편심의 영향이 압연 하중에서 차지하는 비율이 문제가 된다. 즉 현재 측정되는 압연하중에서 편심에 의해 발생하는 압연하중 변동량의 비로 편심의 발생 유무를 판정하는 것이 적합하므로 l 번째 진단 시점에서 $x_{ecc}(l)$ 을

$$x_{ecc}(l) = \frac{P'_{M,ave}(l)}{P_{ave}(l)} \times 100[\%] \quad (16)$$

으로 약속하면, $x_{ecc}(l)$ 은 편심의 유무를 알려주는 적절한 변수가 된다.

이제 $x_{ecc}(l)$ 의 기준값을 설계한다. 편심에 의해 압연 하중이 초기 설정값에서 ΔP 만큼 변동할 때,

디지털 필터를 이용한 단일 스탠드 압연기의 편심 진단 알고리즘

검출하고자 하는 ΔP 의 최소값을 ΔP_{\min} 이라고 약속하면

$$\omega \approx \frac{\Delta P_{\min}}{\text{압연하중의 초기 설정값}} \times 100[\%] \quad (17)$$

이 $x_{ecc}(l)$ 의 적절한 기준값이 될 수 있다. 즉 $x_{ecc}(l) > \omega$ 이면 편심이 발생한 것으로 판정하며, ω 는 설비의 운영 기준에 따라 정해질 수 있다.

Step 3 : 편심 원인의 진단

편심의 발생 원인에는 회전축의 중심과 롤의 중심이 맞지 않는 경우와 롤이 마모된 경우가 있다. 따라서 편심의 원인을 진단하기 위해서는 각각의 원인에 의해 발생하는 편심의 영향 형태를 관찰하여 원인을 구분할 수 있는 지표를 만들어야 한다. 1번째 진단 시점에서 $x_{cause}(l)$ 을

$$x_{cause}(l) = \frac{P'_{ave}(l)}{P'_{M,ave}(l)} \quad (18)$$

로 정의하면, $x_{cause}(l)$ 은 대개 회전축이 불일치하는 경우에는 0.6이상이 되며, 롤이 마모된 경우에는 0.3이하가 된다. 그리고 $x_{cause}(l)$ 이 0.3과 0.6 사이의 값을 갖는 경우는 편심의 원인이 복합적이라고 진단할 수 있다.

3. 모의 실험 및 결과

모의 실험의 목적은 편심이 발생한 경우 본 논문에서 제안한 알고리즘으로 편심의 발생 유무를 검출하고, 그 원인의 진단이 가능한 지를 보이는 것이다.

3.1 모의 실험에 필요한 데이터 생성

모의 실험에서는 롤의 회전 속도가 감소 또는 증가하는, 즉 속도가 변동하는 경우에도 편심의 각 원인별 검출 및 진단이 가능한 지를 보여야 하는데, 실제 조업 데이터로는 각 상황별 시험이 어렵다. 따라서 실제 조업데이터에서 동작점 부근의 압연하중과 잡음 범위를 선정하고, 편심의 각 원인에 따른 압연하중의 변동은 수식으로 생성하여 설계된 알고리즘의 편심 검출 및 진단 성능을 보인다.

회전축이 불일치하는 경우에 발생하는 압연하중의

변동은 $\Delta P_{ecc,axis}(k)$ 라 하고, 롤의 마모에 의해 발생하는 압연하중의 변동은 $\Delta P_{ecc,roll}(k)$ 라 약속하면 각각 식(19)와 식(20)로 표현될 수 있다.

$$\Delta P_{ecc,axis}(k) = \sin(2\pi \cdot f_{roll}(k) \cdot kT_s) \quad (19)$$

$$\Delta P_{ecc,roll}(k) = b \times (a + \sin(2\pi \cdot f_{roll}(k) \cdot kT_s)), \quad (20)$$

단 $\Delta P_{ecc,roll}(k) > 0$ 이면 $\Delta P_{ecc,roll}(k) = 0$

여기서 a 는 롤의 원주 방향으로 롤이 마모된 변위를 의미하는 상수이며, b 는 마모된 크기에 대한 정보를 가진 상수이다.

정상적 작업시 동작점에서의 압연하중을 636[Ton] 및 잡음의 최대값을 0.8[Ton]으로 정하며, 잡음의 형태를 백색 잡음이라 하고 $\Delta P_{noise}(k)$ 라고 약속한다. 그러면 모의 실험에 필요한 압연하중 데이터는 다음과 같은 식들에 의해 만들어 진다.

회전축이 불일치한 경우 :

$$P(k) = 636 + \Delta P_{ecc,axis}(k) + \Delta P_{noise}(k) \quad (21)$$

롤이 마모된 경우 :

$$P(k) = 636 + \Delta P_{ecc,roll}(k) + \Delta P_{noise}(k) \quad (22)$$

복합된 경우 :

$$P(k) = 636 + \Delta P_{ecc,axis}(k) + \Delta P_{ecc,roll}(k) + \Delta P_{noise}(k) \quad (23)$$

또한 롤의 회전속도 변동에 따른 분석창의 오류를 보정하는 기능인 $\beta (> 1)$ 는, β 의 의미를 고려하면 $1 < \beta < 2$ 의 범위를 가지므로 중간값 정도인 1.4로 선정하였고, 중심주파수의 보정 역할을 하는 α 는 $0 < \alpha < 1$ 의 범위를 가지므로 역시 중간값인 0.5로 정하여 모의실험을 하였다. 그리고 모의 실험의 전 구간에서 롤의 회전 주파수($f_{roll}(k)$)의 변동 모양은 표 1과 같다 모의 실험에 사용된 회전주파수($f_{roll}(k)$) 및 압연 하중($P(k)$) 데이터의 모양을 그림 4, 5, 6에 보인다.

표 1. 회전 주파수의 변동 형태
Table 1. Varying patterns of rotation frequency

구간	구간 내 회전 주파수의 변동 형태
가속구간 (0초~29.3초)	초기 회전 주파수(0.504[Hz])에서 사인파 형태로 속도가 증가됨.
정속구간 (29.3초~39.3초)	일정 회전수로 유지
감속구간 (39.3초~67.7초)	사인파 형태로 0.51[Hz]까지 속도기 감소됨
정속구간 (67.7초~모의실험 종료시까지)	0.51[Hz]로 유지

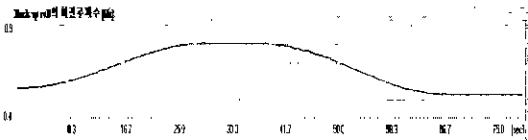


그림 4. 백업롤의 회전 주파수
Fig. 4. Rotating frequency of back up roll

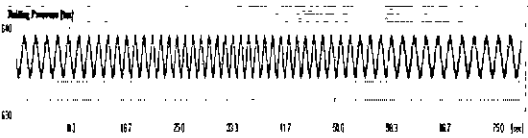


그림 5. 회전축이 롤 중심과 불일치 하는 경우의 압연하중
Fig. 5. Rolling pressure for the case that rotating axis and roll center is not identical

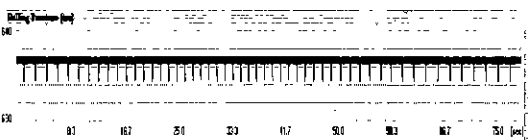


그림 6. BUR의 7%가 마모되었을 경우의 압연하중
Fig. 6. Rolling pressure for the case that back up roll is distorted by 7% portion in the direction of roll circumference

3.2 모의 실험 결과

모의 실험은 크게 세 가지 그룹으로 나누어 진다. 첫 째는 회전축이 롤 중심과 일치하지 않는 경우이며, 둘째는 롤의 일부분이 마모된 경우인데, 원주상으로 마모된 범위가 5%, 7%, 10% 및 12% 인 네가지 경우로 분류하였다. 셋째는 원인이 복합적인 경우인데, 이 때는 회전축과 롤 중심의 불일치 정도와 롤

이 마모된 정도의 비율에 따라, 또 원주상의 마모된 위치가 어디냐에 따라서도 편심의 영향이 다르게 나타난다. 따라서, 원인이 복합적인 경우에는 회전축과 롤 중심의 불일치 정도와 롤의 마모된 정도의 비율이 25%:75%, 50%:50% 및 75%:25% 인 세 가지 경우와, 각 경우에 롤이 7% 마모된 위치가 90° 및 270° 일때에 모의 실험 결과를 보인다.

3.2.1 회전축이 롤 중심과 일치하지 않는 경우

그림 7에 이 경우에 대한 모의 실험 결과를 보인다. 그림 7은 보면 회전축과 롤 중심이 일치하지 않아 압연하중은 636[TON]을 중심으로 사인파 형태로 변동하며, 롤 회전 속도의 가속, 정속 및 감속 구간 등 전구간에 걸쳐 압연 하중에 포함된 편심 성분이 잘 추출됨을 볼 수 있다. 이 때 진단 결과를 보면 $x_{ecc}(l) = 0.3497$ [%] 로서 기준치 $w = 0.1572$ [%] 보다 훨씬 크므로 편심이 발생했다고 알려주며, $x_{cause}(l) = 0.6338$ 이므로 편심의 원인은 회전축이 불일치하는 경우라고 진단하였음을 알 수 있다.

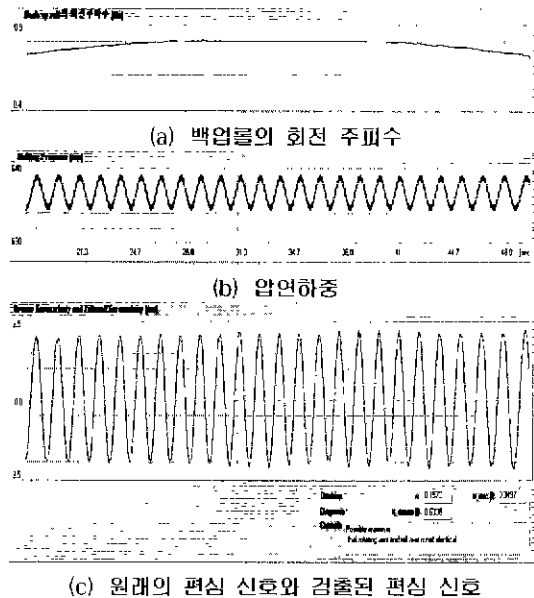
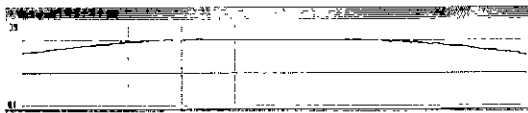


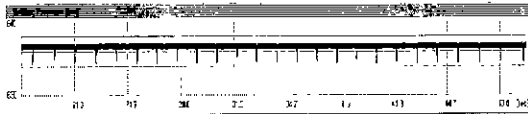
그림 7. 회전축이 롤 중심과 불일치 하는 경우
Fig. 7. The case that rotating axis and roll center is not identical

3.2.2 롤의 일부분이 마모가 된 경우

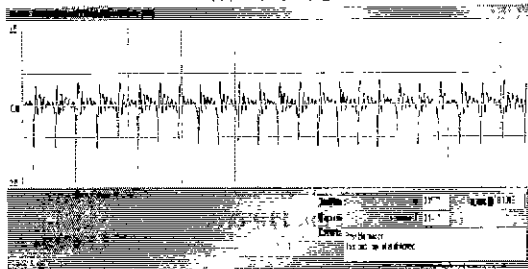
그림 8, 9, 10 및 11에 각각 롤의 원주상으로 5%, 7%, 10% 및 12% 만큼 마모된 경우의 모의 실험 결과를 보인다. 이 경우에는 압연하중이 636[TON]으로 유지되다가 마모된 위치에서 마모된 범위만큼 감소하는 형태로 변동한다. 편심成分的 검출은 6개의 대역 통과 필터 출력을 합하여 얻어지므로, 검출 결과를 보면 모든 경우에 롤이 마모된 위치에서 편심 검출 신호의 크기가 가장 크며 나머지 부분에서는 고조파 성분들이 더해져 나옴을 볼 수 있다. 편심의 진단 결과는 모든 경우에 $x_{ecc}(t) > w$ 이므로 편심이 있는 것으로 점검되며, 모든 경우에 $x_{cause}(t) < 0.2$ 이므로 편심의 원인은 롤의 마모로 진단됨을 알 수 있다.



(a) 백업롤의 회전 주파수

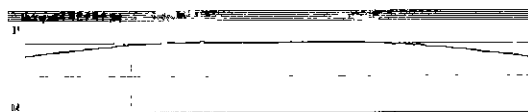


(b) 압연하중

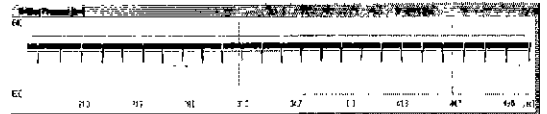


(c) 원래의 편심 신호와 검출된 편심 신호

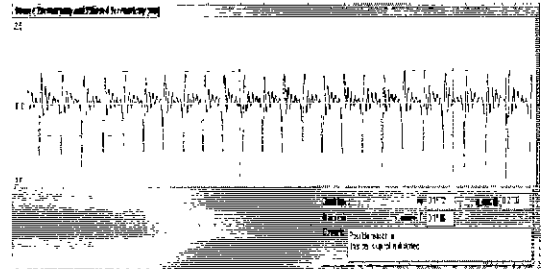
그림 8. 5%의 마모가 있는 경우
Fig. 8. The case of having distortion by 5% portion



(a) 백업롤의 회전 주파수

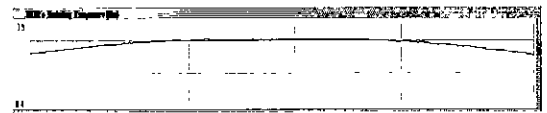


(b) 압연하중

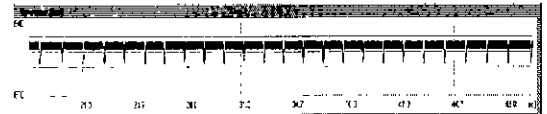


(c) 원래의 편심 신호와 검출된 편심 신호
그림 9. 7%의 마모가 있는 경우

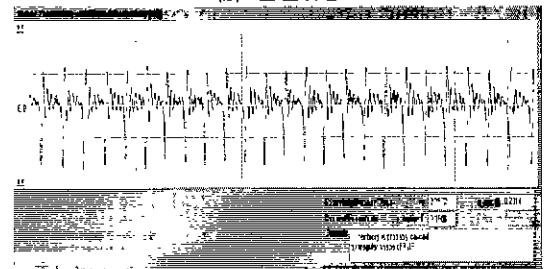
Fig. 9. The case of having distortion by 7% portion



(a) 백업롤의 회전 주파수



(b) 압연하중



(c) 원래의 편심 신호와 검출된 편심 신호

그림 10. 10%의 마모가 있는 경우
Fig. 10. The case of having distortion by 10% portion



(a) 백업롤의 회전 주파수

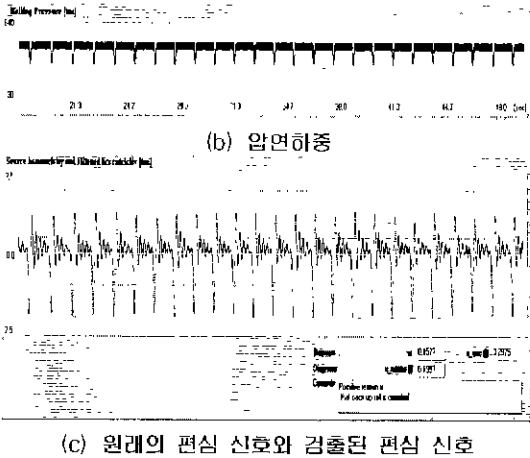


그림 11. 12%의 미모가 있는 경우
Fig. 11. The case of having distortion by 12% portion

3.2.3 복합적인 경우

편심의 원인이 복합적인 경우에는 앞에서 언급한 대로 표 2과 같이 분류하여 모의 실험을 한다.

여섯가지 경우에 대한 모의 실험 결과를 그림 12에서 그림 17에 보인다. 복합적인 경우에 압연하중은 636[ton]을 중심으로 사인과 형태로 변동하면서 롤이 마모된 위치에서 마모된 범위만큼 감소하는 형태가 됨을 볼 수 있다.

표 2. 복합적인 경우의 종류
Table 2. Several cases with composite reason

명칭	편심의 원인		롤의 마모 위치
	원인A	원인B	
	회전축이 롤중심과 불일치 하는 경우	롤이 원주상으로 7% 범위만큼 마모된 경우	
case I-1	원인A(0.5[ton])	+ 원인B(1.5[ton])	90°
case I-2	원인A(0.5[ton])	+ 원인B(1.5[ton])	270°
case II-1	원인A(1[ton])	+ 원인B(1[ton])	90°
case II-2	원인A(1[ton])	+ 원인B(1[ton])	270°
case III-1	원인A(1.5[ton])	+ 원인B(0.5[ton])	90°
case III-2	원인A(1.5[ton])	+ 원인B(0.5[ton])	270°

편심의 원인이 복합적인 때는 편심의 발생 유무를 검출하는 $x_{ecc}(t)$ 은 전혀 문제가 없지만, 원인의 진단은 어떤 원인의 영향이 더 크냐에 따라 달라지므로 원인이 한 가지 일때에 비해 다소 어려움을 알 수 있다. 그러나 진단 결과의 흐름은 상식에 부합된다. 즉 case III-1과 case III-2는 회전축의 불일치 정도가 롤의 마모 정도 보다 훨씬 크므로 $x_{cause}(t)$ 이 각각 0.6284 및 0.5804로서 회전축의 불일치 가능성 쪽으로 진단한다. 또한 case I-1 과 case I-2 는 롤의 마모 정도가 회전축의 불일치 정도보다 훨씬 크므로, $x_{cause}(t)$ 이 각각 0.3355 및 0.2701 이 되어 롤의 마모 가능성이 높은 것으로 진단한다. 이와 같이 원인이 복합적인 경우에는 $x_{cause}(t)$ 의 해석에 다소 어려움이 있지만, 본 논문에서 제안된 편심 진단 기법은 편심의 발생 형태를 시각적으로 보여주기 때문에 화면에 보이는 편심 파형을 관찰하는 것만으로도 쉽게 편심의 원인을 인식할 수 있다.

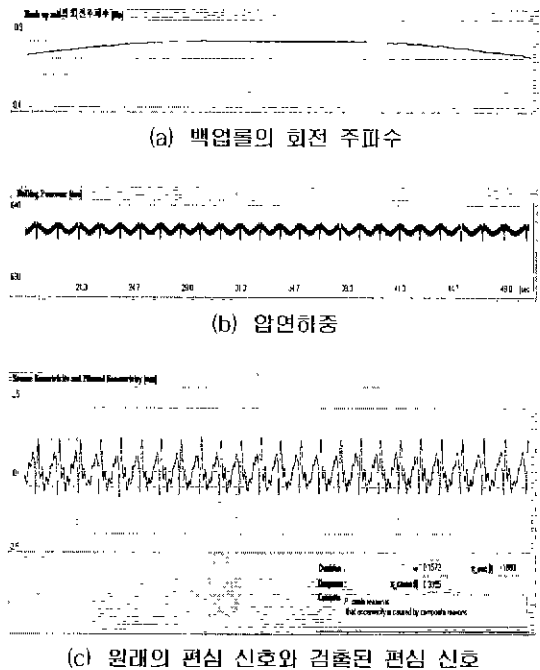


그림 12. case I-1 의 모의 실험 결과
Fig. 12. Simulation results for case I-1

디지털 필터를 이용한 단일 스탠드 압연기의 편심 진단 알고리즘

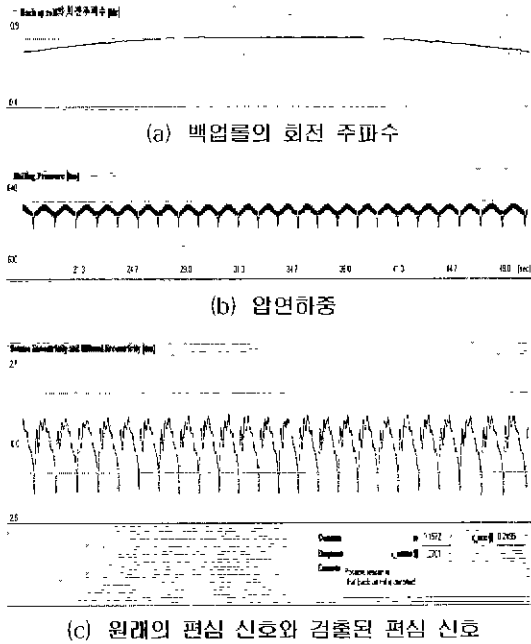


그림 13. case I-2 의 모의 실험 결과
Fig. 13. Simulation results for case I-2

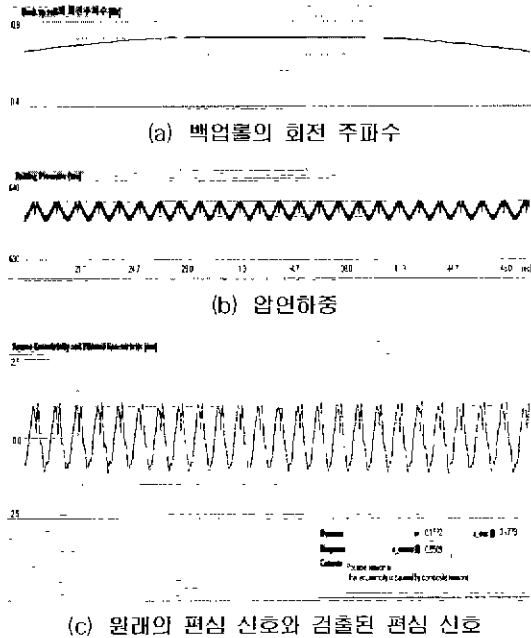


그림 14. case II-1 의 모의 실험 결과
Fig. 14. Simulation results for case II-1

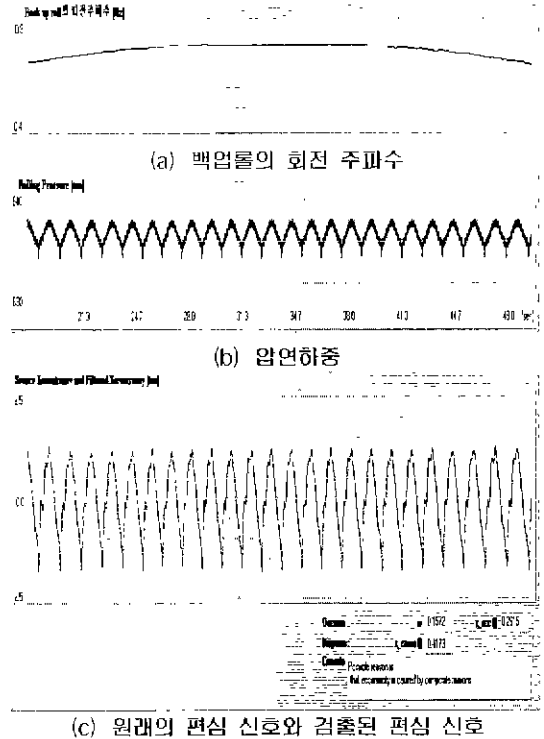


그림 15. case II-2 의 모의 실험 결과
Fig. 15. Simulation results for case II-2

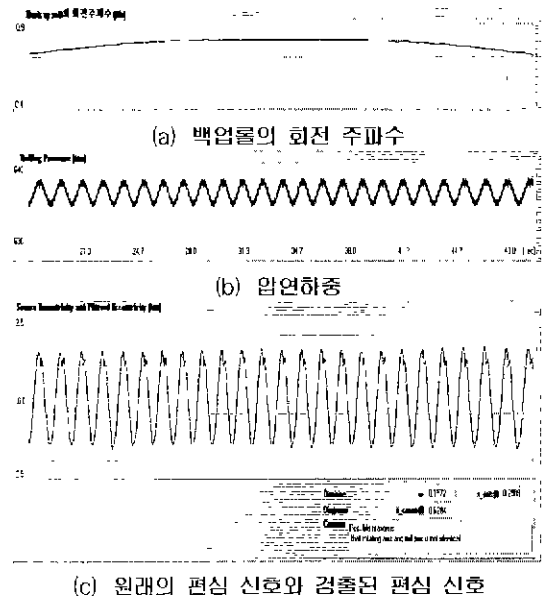


그림 16. case III-1 의 모의 실험 결과
Fig. 16. Simulation results for case III-1

참고 문헌

- (1) V.B.Ginzburg, "High-Quality Steel Rolling Theory and Practice", Marcel Dekker, Inc, 1993.
- (2) 지창운, 이호훈, "열간 압연기의 백업 롤 편심 보상에 관한 연구", RST 연구논문 제11권 제2호, 1997.
- (3) A.Kitamura, T.Takahashi, K.Nose, M.Konishi, "Recursive Identification Technique for Roll Eccentricity Control", World Congress on Automatic Control(IFAC), 10th, 1987.
- (4) J.F.Chicharro, T.S.Ng, "A Roll Eccentricity Sensor for Steel-Strip Rolling Mills", IEEE Trans. on Indus App Vol 26 Nov/Dec, 1990.
- (5) M.J.A.Walker, K.F.Davies, "Measurement of Back-up Roll Eccentricity", ISS 28th Mechanical Working and Steel Processing Conference, 1986.
- (6) Dickon.T.Oliver, D.F.Stewart, "Rolling Mill Eccentricity Compensation Using Actual Measurement of Exit Sheet Thickness", U.S. Patent 4648257, 1987.
- (7) J.F.Cory, S.J.Puckett, G.L.Nessler, "Roll Eccentricity Monitoring for Strip Quality Control", Iron and Steel Engineer, February, 1990.
- (8) P.N.Osgood, T.E.Simmons, "System and Method for Monitoring a Rolling Mill", U.S. Patent 5203188, 1993
- (9) 김신일, 진철제, 김도형, "온라인 롤 편심 진단방법 및 장치", 대한민국특허청 공개특허공보, 공개번호 특 1999-0052675, 1997.
- (10) D.F.García, M.López, F.J.Suárez, J.García, F.Obeso, J.A.González, "A Novel Real-Time Fuzzy-Based Diagnostic System of Roll Eccentricity Influence in Finishing Hot Strip Mills", IEEE Trans. on Industry App Vol.34, No 6, 1998.
- (11) 이해영, "일관제철공정의 자동제어", 유림출판사, 1996.
- (12) 이해영, "압연공정의 자동제어", 춘도, 1997.
- (13) 세개구찌 구니오, 가이 히즈메, 미요카와 마사루, 우에다 겐지, "다중 압연기의 롤 편심 제거 제어 방법 및 장치", 대한민국특허청 특허공보, 등록번호 특1990-0003970, 1987.
- (14) 지창운, "압연기의 편심검출장치", 대한민국특허청 등록실용신안공보, 등록번호 20-0155915, 1995.
- (15) 박인석, 김진욱, 노진대, 우홍현, "열간압연롤의 편심제어장치", 대한민국특허청 공개특허공보, 공개번호 특 1999-0054720, 1997.

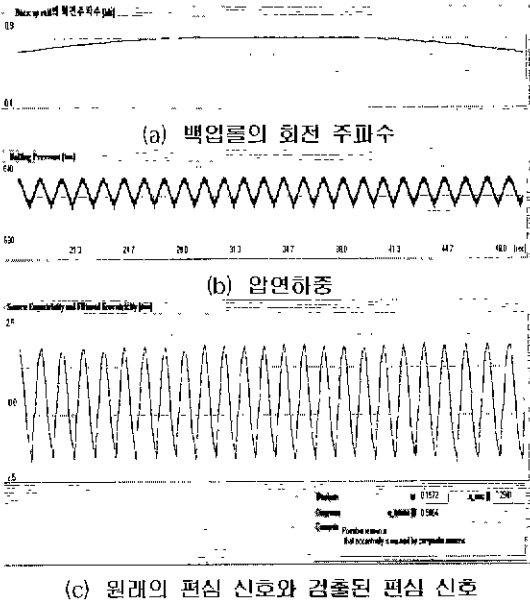


그림 17. case III-2 의 모의 실험 결과
Fig. 17. Simulation results for case III-2

4. 결론

본 논문에서는 압연공정에서 압연시 발생하는 편심의 검출과 그 원인을 진단할 수 있는 기법을 제안하였다. 추가적인 센서를 사용하지 않고 보편적으로 이미 사용되고 있는 로드셀과 타코메타의 출력만을 이용함으로써 대부분의 압연 설비에 쉽게 사용될 수 있도록 설계되었다. 제안된 편심 검출 및 진단 기법은 기능적으로 크게 두가지로 분류된다. 첫 번째는 압연하중과 회전속도에 대한 정보로부터 압연하중에서 편심에 관련된 데이터를 추출하는 것이다. 이 결과는 편심의 실제 발생 모양을 화면에 그대로 보여줌으로서 작업자가 어떤 종류의 편심 문제가 발생했는지 즉시 파악할 수 있도록 해주는 장점이 있다. 두 번째는 추출된 편심 정보 데이터로부터 편심의 유무와 편심의 원인을 자동으로 진단해 주는 기능이다. 롤이 마모된 경우, 회전축과 롤의 중심이 일치하지 않는 경우 및 원인이 복합적인 경우에 대한 여러 가지 모의실험을 통해 본 논문에서 제안된 알고리즘으로 편심의 검출 및 그 원인의 진단까지 가능함을 보였다. 따라서 이런 편심 검출 및 진단 기법은 압연공정의 효율적인 운영에 도움이 될 것이다.

◇ 저자소개 ◇

전 재 영 (全宰永)
1972년 3월 8일생. 1998년 영남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.

김 현 승 (金炫昇)
1972년 12월 4일생. 1999년 영남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.

이 해 영 (李海榮)
1963년 7월 5일생. 1984년 부산대학교 전기기계공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기전자과 석사과정 졸업. 1990년 동 대학원 박사과정 졸업. 1990년~1993년 8월 포항종합제철(주) 기술연구소 연구원. 1993년 9월~현재 영남대학교 전자정보공학부 부교수.