대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 B pp. 578~583 KSME 01S253

열연 사상압연기 진동 특성 분석에 관한 연구

신남호*• 손붕호*

Characteristic Analysis of Vibration in Finishing Mill

N. H. Shin*, B. H. Son*

Key Words : Vibration(진동), Chattering(채터링), Finishing Mill(사상압연기)

Abstract

Chattering phenomenon is an abrupt relative vibration between the strip and rolls of rolling machine in working. It inevitably results from the progress of the degeneration in the mill facilities. This research was carried out in order to analyze the characteristic and find the cause of chatter mark in finishing mill and it was founded that major causes are facility character of driving part and special condition in case of excessive roll force.

1. 서 론

채터링 이란 작업 중에 소재와 제조장치 간에 일어나는 급격한 상대적인 진동으로써, 80 년대 이전에는 주로 절삭가공에서 사용하는 용어였으나, 압연작업의 고속화와 제품정도의 향상에 기인하여 근래에는 압연작업 중에 일어나는 진동현상도 채터링 이라 하고 있으며, 압연기에서의 채터링 현상은 제품의 품질에 지대한 영향을 미칠 뿐만 아니라 설비의 수명단축 혹은 설비사고의 주된 원인의 하나이다.[1]

압연기 채터링에 관하여는 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔으며, 선진제철소의 경우에는 윤활유 계통의 공급유량을 제어하는 방법[2], 두 압연기 사이의 장력변동을 억제하기 위한 장치를 설치하여 진동을 억제하는 방법[3], 압연기 상부에 동흡진기를 설치하여 진동을 억제하는 방법[4] 및 자체 중공업과 연계하여 설비사양 변경 등의 적극적인 방법으로 압연기의 채터링을 제거하는 연구를 수행해 오고 있다.[5]-[7]

포항제철의 경우는 1990 년대 초부터 일반압연기(4 단 압연기), 다단압연기(20 단) 및 형상 교정기 등에 대해 채터링을 방지하거나 줄이기 위해 많은 연구를 수행해 오고 있으며, 주로 채터링 발생 현상을 분석하고, 압연상태 감시시스템을 개발하여 조업 패턴을 바꾸거나 속도를 저감하는 방법을 통해 채터링 현상을 방지하고 있다.

본 연구에서는 열간 압연 공정 중 사상압연기에서 고강도 박물 작업 시에 F1 후단에서 발생하는 채터마크와 F2~F3 에서 큰 소음을 동반하며 발생하는 채터링에 대해 발생현황 및 진동현상을 분석하고, 조업 및 제어신호와의 상관성을 검토하여 대책을 수립하고자 하였다.

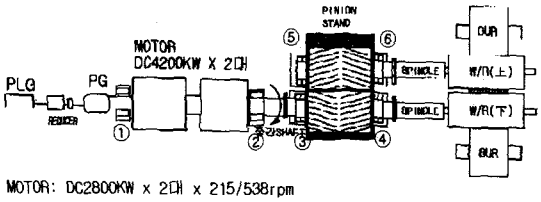
* 포항제철 기술연구소

2. 본 론

2.1 열간 사상압연기의 구성

열간 압연 공정은 분괴 또는 연속주조 공정에서 제조된 슬라브(Slab)를 가열한 후 연속 압연하여 열연코일(Hot Rolling Coil)을 제조하는 공정으로, 열연코일은 주로 강관, 건축물 및 냉연용 등으로 사용된다. 주요설비는 가열로, 스케일 브레이커(Scale Breaker), 조압연기(RM: Roughing Mill), 사상압연기(FM: Finishing

Mill), 권취기(D/C: Down Coiler) 및 전.절단설비로 구성되어 있다. (포)2 열연공장의 사상압연기는 F1~F7 의 일곱 스탠드의 비가역식 압연기(Stand)로 구성되며, 조압연기에서 슬라브가 압연되어 만들어진 바(Bar)가 이 압연기에서 목표 두께 및 폭으로 연속 압연된다.



MOTOR: DC2800KW x 2대 x 215/538rpm
PINION GEAR: Double Helical Gear, 잇수 22개, Module 35
BRG': ①② Metal
③ Double Tapered Roller Brg'(2TR580AY-C3)
④⑤⑥ Double Cylinderical Roller Brg'(100DC7230DH-CS330)

Fig 1. Configuration of mill stand

Fig 1.에는 사상압연기 한개 스탠드(Stand)의 구성도를 보여주고 있으며, 한개의 스탠드는 모터(Motor), 피니언 스탠드(Pinion Stand), 스핀들(Spindle), 하우징(Housing) 으로 구성되어 구동되고 있다. 사상압연기는 Fig 1.과 같은 압연기가 일곱개 연속적으로 배열되어 압연을 수행한다.

2.2 채터링 발생 현황

채터링은 작업 중에 소재와 제조장치 간에 일어나는 급격한 상대적인 진동으로써, 압연기에서의 채터링 현상은 제품의 품질에 지대한 영향을 미칠 뿐만 아니라 설비의 수명단축 혹은 설비사고의 주된 원인의 하나이다. 일반적으로 채터링은 강판 및 압연롤에 채터마크를 동반하게 되는데, 강판에는 압연방향에 수직방향으로, 작업롤에는 길이방향으로 반복적인 줄무늬를 일으킨다.

포항제철소 2 열연공장 사상압연기에서는 주로 고강도 극박재 (두께 1.8mm 이하) 작업시에 F1~F3 스탠드에서 채터링이 발생하고 있으며, 크게 두가지 형태로 나눌 수 있다.

첫번째는 F1 스탠드에서 육안으로 채터마크를 확연히 구분할 수 있는 채터링으로써, Fig 2.와 같이 압연속도에 비례하여 11~13 Hz 사이의 채터마크 주파수를 가지는 채터마크(Chatter Mark)로, 특히 두께변화를 유발하여 제품 품질을 악화시키는 특성을 갖는다.

두번째 형태는 F1 ~ F3 스탠드에서 발생하는 채터링으로 열연 가열로에 장입되기 직전의 슬라브 온도가 150 ℃ 이하인 CCR(Cold ChaRge)재 고강도 박물 작업시에 주로 발생하는 채터링으로 각 스탠드에서 별도로 발생할 때도 있고, 동시에 발생할 때도 있는데, 큰 진동음을 수반하여 제품 결함 및 2차적인 설비이상을 유발한다.

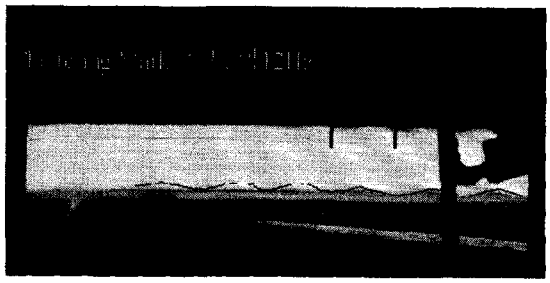


Fig 2. Typical example of chatter mark on strip surface

이때 가열로에서의 재로시간이 길거나 RT4(조압연 출측 Bar 온도)가 평상시 대비 20~30 ℃ 높은 경우에는 진동크기 및 진동음이 현저히 줄어드는 경향을 나타내고 있다.

2.3 채터링 발생시의 접근방법

채터마크 발생시에 접근방법은 두께의 변화 여부, 육안측정 가능 여부와 상하 채터마크 발생 피치 및 위치 동일 여부를 조사하고, 식(1)과 같이 채터마크 주파수를 계산한 후 압연속도와 연계되는 경우는 롤 및 구동부의 회전주기와의 동기성을 조사하여 원인을 추적하거나, 라인속도와 연계되지 않는 경우는 어떤 부분의 설비진동주파수와 어떤 제어신호의 특성과 동기 되는지를 조사함으로 원인을 추적한다.

채터마크 주파수 [Hz] = (1000*압연속도[mpm])
/(60*채터마크 피치[mm]) (1)

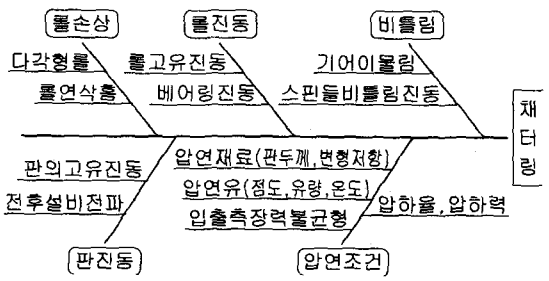


Fig 3. Typical example of chatter mark' s cause

하지만, 실제의 경우에는 Fig 3. 과 같이 여러 가지의 원인이 복합적으로 작용함으로 원인규명이 난해하다.

2.4 진동 및 제어신호 분석

2.2 에서 언급한 것처럼 포항 2 열연공장 사상 압연기에서 발생되고 있는 채터링은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 여기에서는 채터링이 일어나는 F1 ~ F3 각각에서의 진동 및 제어신호의 특성을 분석 하고자 하였다.

Table 1.에는 각 스탠드별 압연조건 및 압연롤의 회전에 의한 발생가능 주파수를 도시했다.

Table 1. Possible rolling condition and frequency

	#1 STD	#2 STD	#3 STD
W/R Dia' [mm]	770~810	770~810	770~810
BUR Dia' [mm]	1450~1510	1450~1510	1450~1510
Line Speed [mpm]	70~85	140~155	235~250
F_{WR} [Hz]	0.46~0.59	0.92~1.07	1.54~1.72
F_{BUR} [Hz]	0.25~0.31	0.49~0.57	0.83~0.91
$F_{WR\ harmonic}$ [Hz]	10.21~12.88	20.17~23.49	33.86~38.89
Problem	Quality fault	Facility fault	Facility fault

2.4.1 F1 스탠드에서의 신호 분석

F1 스탠드에서 발생하는 채터링현상은 열연강판에 채터마크를 발생시키는 경우와 그렇지 않고 압연조건에 따라 특정 주파수로 채터링이 일어나는 경우로 나눌수 있다. 여기서는 채터마크의 발생 특성을 조사하고, 압연작업중에 발생되는 진동 신호와 제어신호 분석을 통해 F1 스탠드의 특성을 조사하였다.

Fig 2.에는 F1 스탠드출측에서 촬영한 채터마크 발생시의 그림을 보여 주었는데, F1 출측의 채터마크는 F2 ~ F7 를 지난 후에는 가시적으로 볼수가 없고, 여러가지 압연상황을 고려할 경우에 라인을 정지 시켜서 채터마크 피치를 측정할 수도 없는 상황이어서 F1 스탠드를 지난 강판의 사진촬영을 통해 채터마크 피치를 측정하였다. 여러 번의 사진촬영을 통한 채터마크 피치는 라인속도의 변동에 따라 미세하게 차이가 나는 것으로 조사되었고, 대표적인 예로 Fig 2. 의 경우에 F1 스탠드의 압연속도가 82mpm 일때에 채터마크 피치는 115mm 로 측정되었는데, 식(1)을 통해 계산한 채터마크 주파수는 약 11.9 Hz 였다. 이때, 작업롤(Work Roll) 및 백업롤(Backup Roll)의 지름은 808 mm 및 1460mm 로써, 회전주파수는 작업롤의 경우는 0.538Hz, 백업롤의 경우는 0.298 Hz 이었고, 채터마크 주파수와 작업롤의 회전주파수의 관계는 작업롤 1 회전에 22 개의 채터마크가 발생하는 것을 알 수 있었다. 특이한 사항은 Pinion Stand 의 Double Helical Gear 의 잇수가 22 개 이다.

하지만, 채터마크의 발생은 Fig 3.에 도시한 것처럼 많은 원인들이 복합적으로 작용하기 때문에 작업롤을 구동하는 부위인 피니언 스탠드 베어링 블록에서의 진동신호 뿐 아니라 압연기 채터링과 관련성이 크다고 알려진 압연하중, 속도 실측치, 모터전류 실측치, F1 후단의 루퍼(Looper) 각도 및 각속도 실측치 및 F1 과 F2 사이의 장력 실측치를 분석하고, 작업롤을 구동하는 부위인 피니언 스탠드 베어링 블록에서의 진동신호를 분석하여 채터마크의 연계성을 조사하였다. 또한, 채터링이 발생할 때 및 발생하지 않을 때의 압연기 진동과 열연코일 진입시 Impulse 에 의한 압연기 진동신호를 측정하여 채터링 및 채터마크의 관련성을 조사하였다.

Fig 4.에는 채터링 발생시의 F1 피니언 스탠드(Pinion Stand) 작업롤 측의 베어링블록에서 측정한 수직방향 진동측정 신호로써, 진동신호는 ICP Type 의 진동센서[100mV/g, 1~4,000 Hz]를 이용하였으며, X 축은 주파수[Hz]를, Y 축은 진동크기[mV]를 나타내었는데, FFT 신호는 채터마크 주파수의 고조파 성분이 두드러지게 나타남을 볼 수 있으며, 이 부위의 구동부의 Mechanism 을 조사한 결과 작업롤 구동기어수가 22 개로 조사되었고, 채터마크 특성분석에서 나타난 작업롤 1 회전에 22 개의 채터마크를 발생시키는 것과 동일한 것으로 조사되었다.

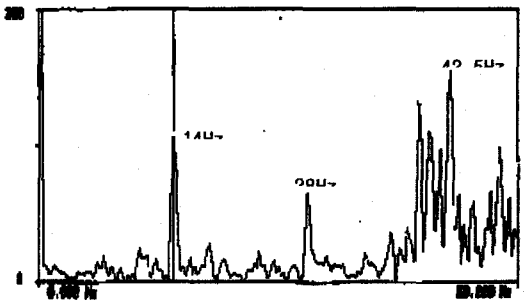


Fig 4. Vibration signal at pinion stand

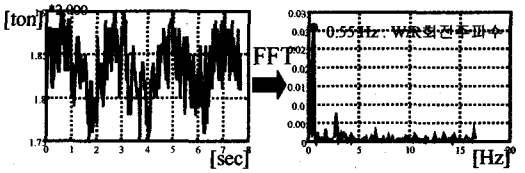


Fig 5. Roll force of F1 stand (D/S)

Fig 5.에는 채터링 발생시의 F1 스탠드의 구동부 압연하중(Roll Force)에 대한 신호로써, X 축은 시간[Sec]을, Y 축은 압연하중의 전압신호를 나타내는데, 채터마크가 발생할 경우에 두께제어를 수행하는 압연하중은 0.55Hz 로써 작업롤의

1X 성분으로 진동함으로 이는 작업롤의 회전주기에 큰 영향을 끼치는 것으로 보인다.

Fig 6.에는 F1 스탠드의 모터전류(Motor Current) 실측치에 대한 FFT 신호로써, X 축은 주파수 [Hz], Y 축은 암페어[A]를 나타내는데, 모터전류 실측치는 4.03 Hz 로 진동하며, 압연속도에 비례하고 채터마크 주파수의 1/3 에 해당되는데, 이는 압연 스탠드의 구동에 가진을 주는 1차적인 요소가 모터 임으로 보아 채터마크 발생에 간접적인 인자로 작용하는 것으로 추정된다.

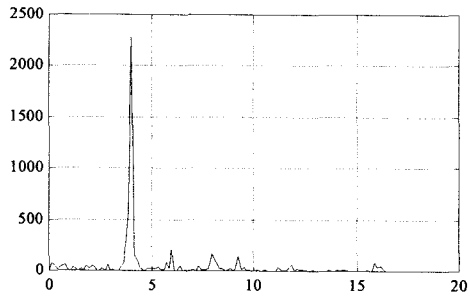


Fig 6. Motor current of F1 stand

Fig 7.에는 F1 과 F2 스탠드 사이의 루퍼각속도에 대한 FFT 신호로써 X 축은 주파수 [Hz], Y 축은 각속도[rad/sec]를 나타내었다. 루퍼각속도의 가변 주파수는 작업롤의 2X 성분과 10Hz 및 채터마크 주파수인 12.3 Hz 의 성분이 혼조하는데, 12.3 Hz 의 경우에 F1 스탠드를 지난 스트립(Strip)의 두께변화가 루퍼의 각속도 신호로 나타나는 것으로 추정된다. 이 경우 스트립의 두께변화가 심하여 루퍼 각속도에서 나타나는 채터마크 주파수가 일정수준 이상인 경우에는 후단의 스탠드에서 일정 수준으로 압연작업을 하더라도 심각한 품질 결함을 발생 시킬 수 있다.

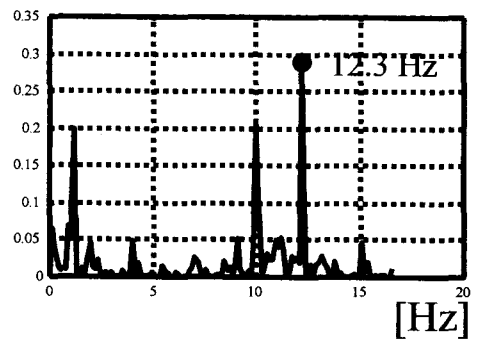


Fig 7. Looper angle speed between F1 and F2 stand

Fig 8. ~ Fig 10.에는 비압연시, 코일진입시 및 채터링 발생시의 수직 및 수평방향 진동측정 신호를 나타내었다.

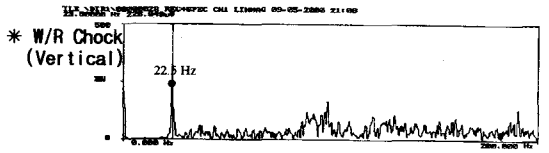


Fig 8. Vibration signal at no-rolling state

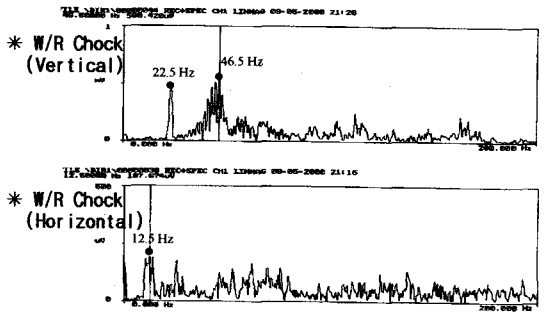


Fig 9. Vibration signal at coil input state

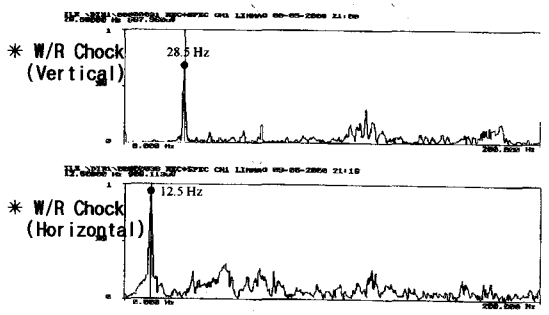


Fig 10. Vibration signal at chattering state

위의 그림에서 진동측정위치는 F1 스탠드 상부 W/R(Work Roll) Chock 의 수직 및 수평방향이며, X 축은 주파수를 나타내고, Y 축은 진동크기를 나타낸다. 압연기에서는 가진 실험을 행할 수 없기 때문에 압연기의 고유진동특성은 코일진입시의 Impulse 에 의한 수직 및 수평방향의 진동센서 부착위치의 신호측정을 통해 입수하고자 하였으며, 수직방향은 22.5 Hz 와 46.5 Hz 부근에서 고유한 성질을 가지며, 수평방향은 12.5Hz 부근의 고유특성을 가지는 것으로 추종된다. 수직방향의 경우 22.5Hz 는 비압연시에도 나타나는 신호인데, 압연이 시작되면은 사라지며, 특히 채터링이 발생될때는 Fig 10.에서 보여지는 것과 같이 28.5Hz 의 다른 진동성분이 나타나게 된다. 수평방향의 경우에는 코일진입시의 12.5Hz 성분이 채터링 발생시에도 동일하게 나타나며, 이는

채터마크 발생 주기와 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한, 채터링발생시의 수직방향 진동 주파수는 25 ~ 35 Hz 로 동일 코일 내에서 압연속도와 무관하게 가변되는 경향을 보이고 있다.

2.4.2 F2 와 F3 스텐드에서의 진동신호 분석

F2 & F3 스텐드에서 발생하는 채터링현상은 큰 진동음을 수반하는 진동으로 수직방향이 수평방향에 비해 큰 진동을 나타내며 일어나고 있다. 또한, F2 ~ F3 의 압연속도는 F2 의 경우는 140 mpm 이상, F3 의 경우는 235 mpm 이상이기 때문에 PLC 로 부터의 30ms 로 취득되는 제어신호에 대한 주파수 변환은 무의미하기 때문에 전체적인 경향만을 조사하였고, 여기서는 냉연강판 진입시 및 채터링 발생시의 진동신호 분석을 주로 행하였다.

대표적인 예로, Fig 11. ~ Fig 12.에는 F2 & F3 스텐드에서 코일진입시 및 채터링 발생시의 수직방향에 대한 진동측정 신호를 나타내었으며, X 축은 주파수를 나타내고, Y 축은 진동크기를 나타낸다.

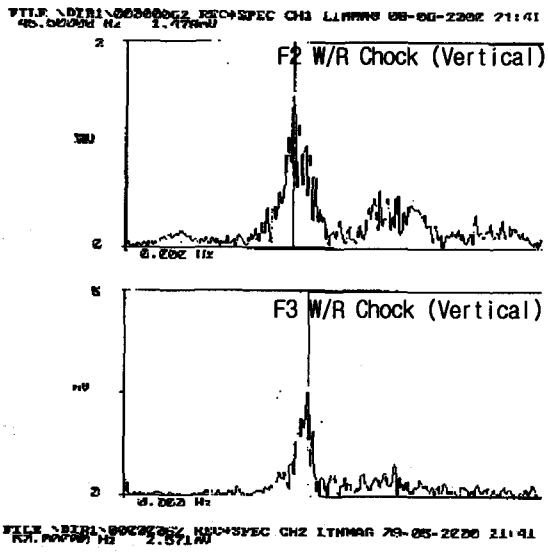


Fig 11. Vibration signal at coil input state

위의 신호를 통하여 알수 있는 사항은 코일진입시에 F2 스텐드의 고유 주파수는 수직 및 수평방향에서 45 ~ 55 Hz 가 존재하며, F3 스텐드는 수직 및 수평방향에 50 ~ 60 Hz 범위의 고유 주파수가 존재하고 있다. 또한, 채터링 발생시에 F2 & F3 의 채터링 주파수는 65 ~ 75 범위에서 발생되고 있어서 압연기 자체의 진동 주파수와 채터링 주파수는 관련이 적다고 판단된다. 특히, 채터링이 발생하는 주파수는 동일 코일에서 동일 작업조건하에서 최대 12 Hz 이상 변화하는 모습을 나타내고 있어서 이는 설비의 문제 보다는 압연이론과 관련이 큰 것으로 보여진다.

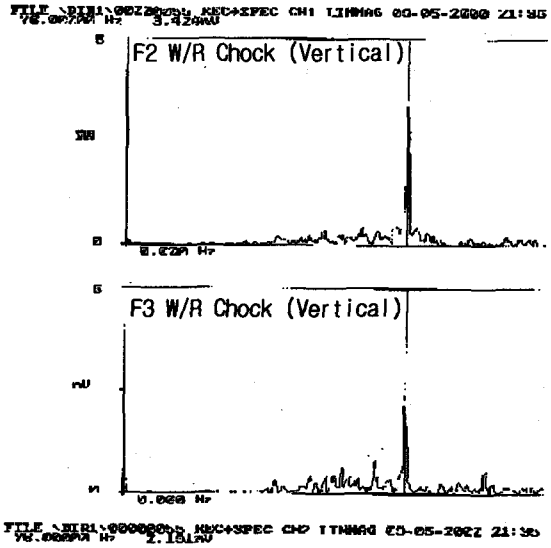


Fig 12. Vibration signal at chattering state

Fig 13.에는 대표적인 예로 JS-SPA-H 강종, 두께 1.6mm 작업시의 F2 & F3 스텐드 수직방향 채터링 주파수의 변화되는 모습을 나타내었는데, X 축은 주파수를, Y 축은 진동신호를 나타내고 있다.

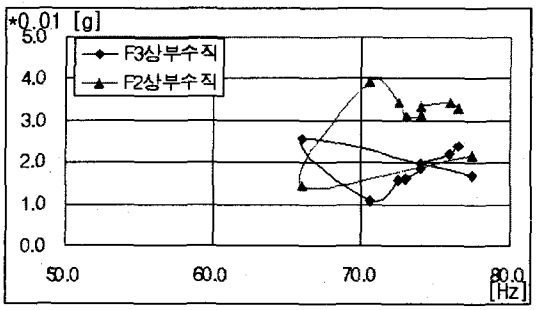


Fig 13. Variation of chattering frequency at same coil

3. 결 론

포항제철소 2 열연공장 사상압연기에서는 주로 고강도 극박재 (두께 1.8mm 이하) 작업시에 F1-F3 스텐드에서 채터링이 발생하고 있으며, 크

게 두가지 형태로 나눌 수 있는데, 첫번째는 F1 스탠드에서 육안으로 채터마크를 확연히 구분할 수 있는 채터링이며, 두번째 형태는 F1 ~ F3 스탠드에서 발생하는 큰 소음을 동반하는 채터링으로 2 장에서 측정한 진동 및 제어신호를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

O F1 에서 발생되는 채터마크는 압연기의 수평방향 고유주파수와 구동부의 설비특성 (Spindle의 비틀림 고유진동, Pinion Stand Gearmesh 진동) 및 특수강종의 작업조건이 결합되어 발생되고 있는 것으로 사료된다.

O F1 ~ F3 에서 큰 소음을 동반하는 채터링은 설비의 고유특성 보다는 압연조건에 많은 영향을 받는것으로 보이는데, 특히 가열로에서의 제로시간이 길거나 RT4(조압연 출측 Bar 온도)가 평상시 대비 20~30 ℃ 높은 경우에는 진동크기 및 진동음이 현저히 줄어드는 경향을 보이므로 작업조건의 미세한 조정이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

(1) 이영호, 손봉호, 1993, " FM stand 진동 발생 mechanism 해석" , 포항제철 연구결과 보고서.

(2) 특허 : JP09239430.

(3) 특허 : JP08238510~JP08238512

(4) 특허 : JP08247211

(5) Wilhelm Hofmann, Heinrich Aigner, 1998.1, "Reduction of chatter marks during skin pass rolling of steel strips", MPT International, pp. 98-102.

(6) J.Tlusty, S.Critchley, 1982.1, "Chatter in cold rolling" , Annals of the CIRP, Vol. 31, pp. 195-199.

(7) I.S.Yun, W.R.D.Wilson, K.F.Ehmann, 1998, "Review of chatter studies in cold rolling", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 38, pp. 1499-1530.