

# 제철 열간 압연기의 진동 저감책

노 용 래\*

## ( Vibration Reduction of Steel Hot-Rolling Facility )

( Yongrae Roh )

### 1. 서론

최근 산업 수준이 고도화됨에 따라, 모든 산업에 기본적으로 요구되는 금속 박판의 품질 또한 예전에 비해 상당히 높아졌다. 따라서 종래에는 무시되던 공정상의 문제가 새로이 중요한 품질저하 요인으로 대두되는 경우가 많다. 금속박판을 생산하는 수많은 공정중, 진동에 관련되고 제품품질에 직접 영향을 미치는 후단 공정으로 압연공정을 들 수 있다. 압연공정에 나타나는 진동 문제는 통상 크게 두가지를 들 수 있는데, 첫째는 third octave와 fifth octave에 나타나는 mill chattering 현상이 있고, 둘째는 공정 제어시스템 상에 나타나는 유해 진동 성분으로서 대표적인 예로 박판 두께조절용 AGC (Automatic Gain Control) 시스템의 진동 신호를 들 수 있다. 첫번째의 mill chattering 관련 연구는 현재 진행중이므로 후속 논문에서 언급하기로 하고, 본 논문에서는 AGC 시스템 중 특히 금속 박판의 두께를 감지하는 위치센서의 유해 진동성분의 원인을 파악하고, 그 해결책을 제시하고자 한다.

그림 1은 제철 압연공정에서 일반적으로 사용되는 열간 압연기의 간략도를 보인다. 그림에서 금속 후판이 Stand Roll로 진입하면, 미리 예정된 두께 제어 프로그램에 의해 Roll들에 압하력이 가해지고, 이 힘에 의해 철판의 두께가 얇아져 최종적으로 후판이 생산된다. 여기서 가해진 압하력이 규정치만큼의 두께 감소를 일으키는지, 즉 Roll들 간의 간격이 예정된 만큼 유지가 되는지는 상부 Top Plate에 설치된 위치센서에 의해 측정이 되어 규정치에 미달하거나 넘치는 경우 제어 시스템에 의해 Roll 간격이 조절된다. 즉 적절한 두께의 금속 박판을 만들기 위해서는 그림의 위치센서의 정확한 작동이 전체 Stand의 작동에 결정적인 요소가 된다. 그러나

압연기 stand에 slab가 진입, 추출할 시에는 그 충격으로 인해 위치센서가 동반진동을 하고, 이에 의해 제어 유압펌프에 Feedback되어 Top부 제어계에 Hunting이 발생하고, 따라서 Slab의 전반, 후반부에 두께편차가 발생하고 있다. 그림 2는 전형적인 위치센서 출력치를 보인다. 그림에서 원으로 쳐진 부분이 이상 진동 신호가 겹쳐져서 실제 박판에 나타나는 두께 변화치보다 과장되어 측정이 된 부분이다. 또한 실제 이상으로 과다한 여진현상도 문제점으로 지적된다. 열연 품질향상을 위해서는 이 문제의 해결이 반드시 필요하여 과거 많은 노력을 기울여 왔고, 외국 선진기업 (Davy Mckee)의 도움까지도 의뢰하였으나 뚜렷한 효과를 거두지 못한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 어려움을 해결하고자

가. 위치센서의 작동 상태 점검

나. 압전 소자를 이용한 AGC Stand Top Plate의 진동 상태 측정 및 분석

다. AGC Stand Top Plate와 센서의 진동 특성을 고려한 진동 억제책 제시를 하고, 제시된 개선책에 의해 AGC Stand Top Plate와 센서의 구조를 변경하여 장착한 후, 동일한 측정, 분석을 반복하여 진동 증폭현상과 여진현상의 개선효과를 확인하고자 한다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1. 위치센서의 작동상태 측정 및 분석

현재 사용중인 위치 감지센서는 Electromagnetic 형 감지기를 Stand에 부착하기 쉽게 조립한 형태로서 최고 2.5 $\mu$ m의 정밀도를 가지는 Board Type Detector이다. 자기장의 발생원으로는 영구자석을 사용하였고 그 작동원리는 잘 알려진 Electromagnetic 센서 방식식

\*산업과학기술연구소 (정희원)

$$V = B l u \quad (1)$$

로 주어지며, 이때  $V$ 는 센서의 출력전위,  $B$ 는 Magnetic Flux Density,  $l$ 은 센서 봉의 길이,  $u$ 는 봉의 선속도이다. 이러한 원리에 의한 센서는 무수히 많으며, 오래전부터 그 신뢰성이 입증된지라 감지부 자체의 문제에 의해 센서에 자체진동이 발생한다고 보기는 어려운 점이 있다. 센서의 조립과정에서 센서의 감지부인 봉을 지지하고,

$$W = 0.5 k x^2 \quad (2)$$

$k$ : Spring 상수

$x$ : Spring 변위량

로 나타나는 내탄성에너지를 높이기 위해 Spring을 외장내에 삽입하였는데, 문제는 이 Spring이 가질 수 있는 내탄성에너지의 한계와, 외부에서 주어지는 운동에너지의 크기가 이 내탄성에너지의 크기를 넘어서는 경우에는 이 Spring에 의한 진동이 발생할 수 있다는 점이다. 따라서 이러한 센서자체의 진동발생 소지를 없애기 위해서는 센서내의 Spring의 상수값  $k$ 를 높이거나, 초기 변형치  $x$ 값을 늘려서 외부로부터 주어지는 운동에너지 양이 이 Spring이 견뎌낼 수 있는 내탄성에너지의 크기 이내로 들도록하여야 한다. 단, 주의해야 할 점은, 이상의 방법에 의해 센서의 내탄성에너지의 크기를 너무 높여서 원래 측정하고자 하는 위치변화마저 읽지 못하는 오류를 범하지는 않도록 하여야 한다.

## 2.2. AGC Stand Top Plate의 진동상태 추정 및 분석

Disk형 AGC Stand Top Plate는 중심부분이 고정되고 끝부분은 자유단 형식으로 설치되어 있다. 위치센서는 그림 1과 같이 Stand축에 고정이 된 채, Top Plate 자유단 부근에 대한 센서 자신의 상대적인 상하 위치를 측정하게 되어 있다. 그림에서 상부 Stand축과 Top Plate는 Stand 외장과 연결이 되어 고정되어 있어서 센서 측정점의 상하 변화는 곧 상부 Roll의 위치 변화, 즉 하부 Roll들은 고정되어 있으므로 Roll 간의 간격을 나타내게 되어 있다. Top Plate에 전혀 움직임이 없다면 이러한 원리가 잘 들어 맞으나, 실제로는 Stand축을 따라 전달되는 충격력에 의해 Top Plate의 자체 진동이 생겨 위치센서의 정확한 작동이 방해받고 있다. Plate는 형태적으로 원주방향으로는 대칭성을 이루어 센서의 감지부에 별 영향을 미치지 않는 것으로 보이나, 자유단은 센서의 감지부에 직접 연결되어, 특정한 역학적 구속력 없이 방치된 상태이므로, Plate의 축방향 진동은 센서의 측정값에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이러한 Annular Plate의 진동 mode

는 rectangular plate와 같이 매우 복잡한 양상을 띠나, 본 연구의 대상인 AGC Stand Top Plate는 그림 3-a의 유한요소 모델로 행한 Modal Analysis와 진동 신호 분석 결과 단지 기본 모드만이 지배적인 것으로 나타났다. 그림 3-b에 보인 모드 1의 경우, 대칭성에 의한 원주방향의 진동은 무시할 때, Plate의 축방향진동은 식 3과 같이 Single Degree of Freedom을 가지는 비감쇄성 자유진동자로 단순화시킬 수 있다 (그림 4).

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (3)$$

여기서  $m$ 은 질량,  $k$ 는 탄성계수,  $x$ 는 변위, 그리고  $F(t)$ 는 외력이다. AGC Stand Top Plate 자유단에 별도의 충격이 가해지는 것은 아니므로  $F(t)$ 는 무시하고, 질량  $m$ 에 의한 자유단의 Static Deflection은

$$\delta = \frac{mgL^3}{3EI} \quad (4)$$

로 나타나는데, 이때  $E$ 는 Plate 재료의 탄성계수,  $I$ 는 근사화시킨 외팔보의 2차 관성모멘트이다. 식 4에서 볼 수 있듯이 Top Plate 자유단의 진동, 즉 센서가 느끼는 물리량인 진폭을 줄이기 위해서는 분자의 항들,  $m$ 과  $L$ 을 작게하여야 한다. 즉 지금의 센서 설치 상태에서 센서를 좀더 Stand의 축방향으로 이동을 시키면 식 4의  $L$ 을 감소시키는 효과가 나타날 것이고, Plate의 센서 바깥쪽의 길이를 가능한 한 줄이면 식 4의  $m$ 을 감소시키는 효과가 나타날 것이다. 또한 Plate의 두께를 늘리면  $I$ 를 증가시키는 효과가 나타날 것이다.

이상은 AGC Stand Top Plate의 진동특성을 단순화시켜 해석한 것이고, 이러한 Plate 자체의 진동을 감지하는 방법으로, 본 연구에서는 신뢰성에 의심이 가는 사용중인 위치센서 대신에 실험실에서 정확성이 검증된 별도의 압전물질로 만든 진동센서를 채용하였다. 압전 진동센서를 Plate의 표면에 부착하였을 경우, Plate 자유단에 휨진동이 가해지면 소자 중간부분의 응력을  $\sigma$ 라고할 때 그림 5와 같

이 센서는 Plate의 휨 곡률  $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ 에 비례하여 전압을 발생하게 되는데, 압전체의 구조방정식에 의해 센서방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$V_s = t_p E, = t_p g_{31} \sigma, = g_{31} t_p (M/I) y \quad (5)$$

여기서  $V_s$ 는 센서에 의해 발생한 전압,  $E$ 는 센서에 의한 전기장,  $g_{31}$ 은 압전상수,  $M$ 은 Bending Moment이다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 위치감지 센서

외부에서 장입되는 Slab에 의한 충격으로 인해 탄성체인 AGC Stand축이 어느 정도의 상하 운동을 하는 것은 피할 수 없는 일이며, 또 이러한 현상에 의한 두께 편차를 줄이기 위해 Hydraulic Thickness Control System을 설치하였다. 그러나 그림 2에서 보듯이 문제의 핵심은 Stand축의 상하운동이 실제보다 더 증폭이 되어 나타나고, 그 충격이 사라진 후에도 잔류여진이 센서에 의해 검출이 된다는 것이다. 이 잔류여진이 위치센서의 오동작에 의한 것임은 그림 6에 나타낸, 압전 센서에 의해 측정된 결과에는 여진이 보이지 않음에 의해서도 알 수 있다. 따라서 위치센서에 나타나는 여진의 대부분은 센서 자체의 오동작에 의한 것임이 밝혀졌다.

센서의 오동작 여부를 점검하고 개선효과를 알아보기 위해서, 위치센서를 만능시험기인 MTS에 설치하여 실제상황과 같은 속도로 외부 변위 (25mm/sec.)를 상하로 가하여 출력치를 MTS 자체 출력치와 비교하여 보았다. MTS출력치란 자체 LVDT센서의 출력치로, 이 값의 신뢰성은 최대 200mm/sec.의 속도까지는 MTS 제작회사 및 그동안의 실험에 의해 보장되는 값이다. 측정 결과는 그림 7과 같다. MTS에서 나오는 출력치는 변위량을 직접 나타내는 값이나, 위치감지 센서에서 나오는 값은 장치 구성상의 어려움으로 인해 직접 변위량이 아닌 센서 Decoder에 들어가기 직전의 간접 신호량을 구하였다. 그림에서 두 종류의 출력치를 비교해 볼 때, 위치감지 센서의 출력치는 외부에서 변위가 가해질 때나 그렇지 않을 때나 평탄한 출력 값의 진폭을 보여야 하나, 그림에서 보듯이 외부에서 변위가 가해지지 않을 때는 평탄하나 변위가 가해지는 중에는 순간적인 Peak형태의 이상 출력치를 계속 나타내고 있다. 이 값이 비정상적임은 식 1에서, 가해지는 변위의 속도가 일정하면, 동일한 B와 1에 대해 V값이 일정해야 함에 의해 알 수 있다.

다음으로, 위치감지 센서내의 Spring의 초기 변형치를 60mm 증가시켜 센서의 내탄성 에너지량을 증가시켰을 때의 측정치는 그림 8과 같다. 예상대로, 외부에서 가해지는 변위가 없을 때는 개선전과 동일한 출력치를 보이나, 외부변위가 가해질 경우에는 개선전보다 훨씬 적은 이상신호를 보임을 알 수 있다. 따라서, 압연기 stand에 slab가 진입, 추출 시에 후판 전반부에 생기는 이상진동의 원인은 사용되는 위치 감지센서의 자체진동에 의한 오동작에 의한 것임이 확인되었고, 이 위치 감지센서의 오동

작은 센서내의 Spring의 초기변형치를 증가시킴으로써 줄일 수 있음 또한 확인되었다.

#### 3.2. AGC Stand Top Plate

Plate 자유단의 진동상태 측정을 위해 Plate상에 4개의 압전 진동센서를 설치하였다. 측정은 2.1절에 설명한 바와 같은 원리로 하였다. 실험 방법은 앞 절에서 언급한 문제들을 점검하고 개선된 효과를 알아보고자, Plate의 구조를개조하기전과 개조한 후에 각각 측정하여 서로 비교하였으며, 개선된 내용은, Plate의 전체 크기는 줄이고, 두께는 늘였으며, 센서의 설치부는 되도록 Stand축에 가깝게 이동시켰다. 측정은 Stainless Steel재, 박물재, BP재, 냉연재 등 총 4가지 강종에 대하여 이루어졌으며, 각각의 강종에 대한 측정결과는 표 1 과 2에 나타내었다. 결과들은 두가지 경우, 즉, Slab가 Stand에 장입되는 순간의 최대 진동폭과 Slab가 Roller내에 장입된 상태에서의 평균 진동폭으로 구분을 하였다. 또한 각 표에는 Plate 구조의 개선에 따른 진동폭의 감소효과도 보였다. 여기서 개선시란 Plate뿐만 아니라 센서구조 또한 개선이 이루어진 후를 뜻하므로 이들 표에는 센서개선에 의한 영향도 포함이 되어 있으나, 나타낸 평균값들에는 센서에 의한 잔류여진량은 배제되어 있으므로, Plate 구조의 개선에 따른 진동폭의 개선효과가 주로 반영되어 있다. 표에서 강종에 따라 개선효과의 차이가 있는 것은, Slab의 재질에 따라 Stand에 가해지는 충격에너지량에 차이가 있기 때문이다. 그림 9는 개선전과 개선 후의 위치센서의 출력치를 예로서 보여준다. 결과에서 보듯이, 우선 센서의 여진은 거의 완벽히 사라졌고, 외부에너지에 의한 진폭 또한 상당 부분 감소되었는데, 표 1에서 보듯이 최대 82.7%까지 진동 감소효과가 나타났다. 따라서 문제가 되었던 두 가지 항목, Slab의 장입과 추출후의 잔류여진 문제와 충격진동의 Plate에 의한 증폭현상이 상당 부분 해결이 되었고, Hydraulic Pump에서의 Hunting현상도 제거되었다. 그림 10은 압전센서에 의한 진동측정치를 개선전과 개선후에 대해 비교해본 것이다.

표 1. 후판이 장입된 상태에서의 평균진동폭 단위 : mm

	개조전	개조후	개선효과(%)
Stainless Steel	0.3074	0.0934	69.9
BP재	0.6739	0.1168	82.7
박물재	0.4942	0.1066	78.4
냉연재	0.3452	0.1010	70.8

표 2. 후판이 장입되는 순간의 최대 진동폭

단위 : mm

	개조전	개조후	개선효과(%)
Stainless Steel	1.4937	0.6571	56.0
BP재	1.1063	0.7233	39.8
박물재	1.3805	0.3150	77.2
냉연재	1.9394	0.4947	74.5

#### 4. 결론

본 연구에서는, 제철 열간 압연기에서 slab가 진입, 추출시 충격으로 인한 진동에 의해 두께 조절용 위치센서가 오작동을 하는 원인을 규명하고 그 해결책을 제시하고자, 기존 AGC Top Plate와 위치 감지센서의 작동 상태 및 진동특성을 검정하였고, 문제점을 발견하여 각각의 구조를 개선, 재측정하여 개선정도를 확인하였다. Disk형 AGC Top Plate는 직경을 줄이고, 두께를 늘여 자체 진동을 감소시켜, Plate 진동에 의한 위치센서의 오작동 원인 및 이에 의해 제어 유압펌프에 Feedback되어 Top부 제어계에 발생하는 Hunting현상을 줄였다. 위치센서는 내부 Spring의 초기변형량을 증가시켜 내탄성에 너지량을 증가시켜, 센서자체의 진동 및 측정시 나타나는 여진현상을 제거하였다. 본 연구를 통한 측정결과로는 최대 82.7%의 제진효과와 여진현상의 제거효과를 보았다.

#### 5. 참고 문헌

1. G.S. Nurre, Journal of Guidance, vol. 7, No. 5, p.514-526, 1984
2. C.K. Lee, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 87, No. 3, p.1140-1158, 1990
3. R. M. Guo, Iron and Steel Engineer, vol. 70, No. 1, p. 29-39. 1993
4. S. Timonshenko, D.H. Young and W. Weaver, Jr., John Wiley & Sons, New York, 1974

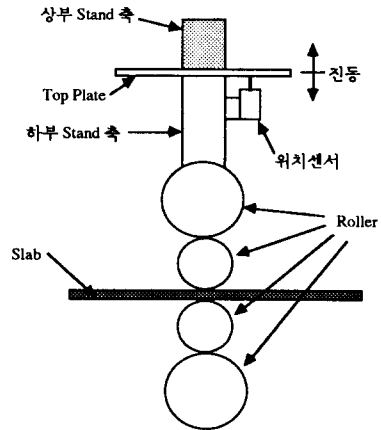


그림 1. 금속박판 압연용 AGC Stand

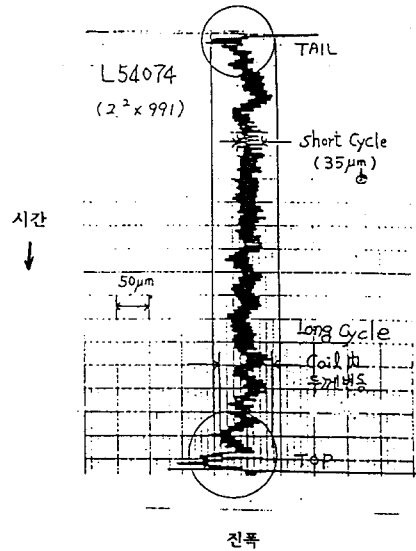


그림 2. 위치센서에 의한 박판두께 측정결과

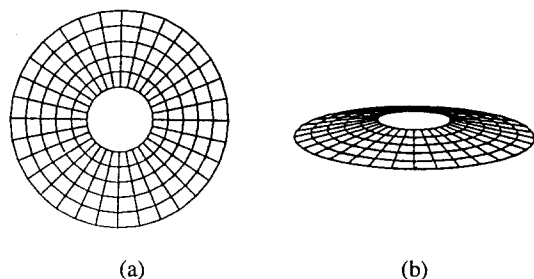


그림 3. (a) Plate의 FEM 모델 (b) 진동모드1의 형태

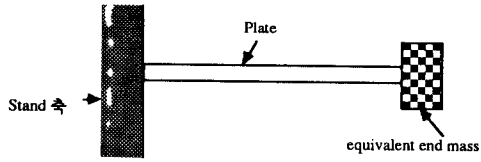


그림 4. Plate의 SDF 구조로의 단순화

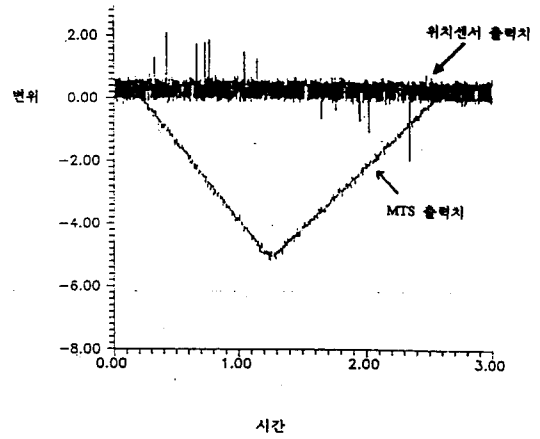


그림 7. 위치센서의 개선전 출력치

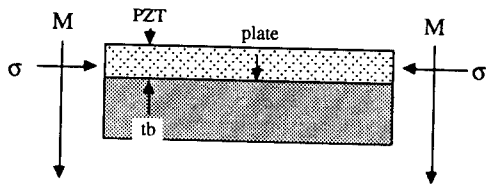


그림 5. Plate에 부착된 압전센서의 원리도

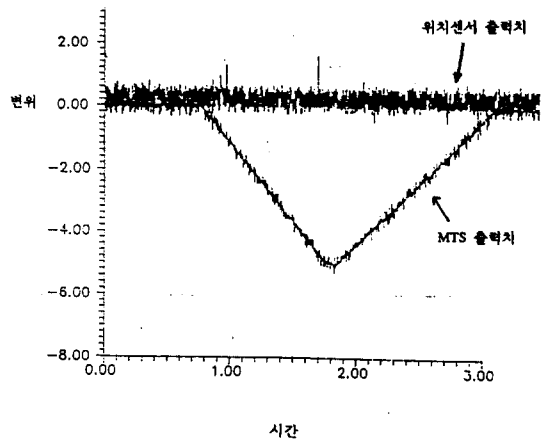


그림 8. 위치센서의 개선후 출력치

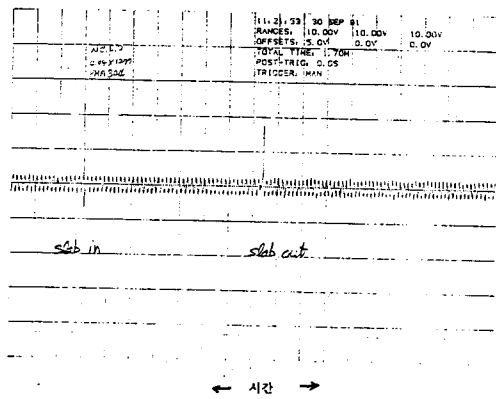


그림 6. 압전센서에 의한 Plate 진동상태 측정결과

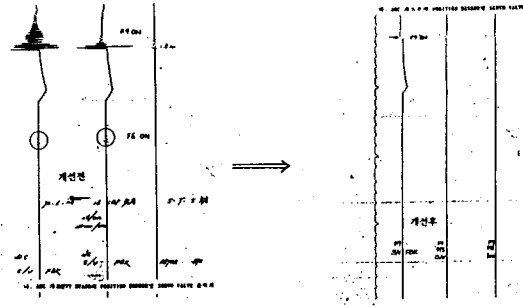


그림 9. 개선전과 개선후의 위치센서 및 유압펌프의 실제상황 출력치

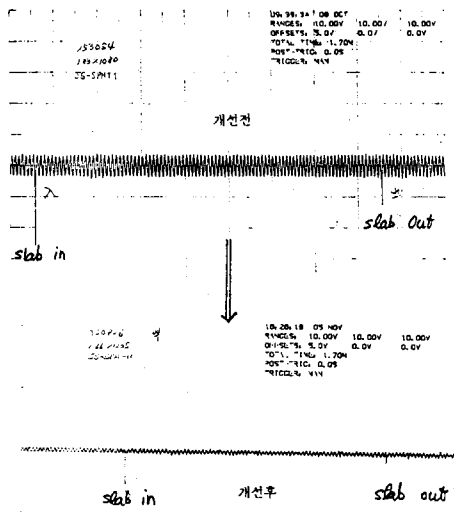


그림 10. 개선전과 개선후의 압전센서 출력치