Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 26(1) : 104~109, 2016
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2016.26.1.104

한국소음진동공학회논문집 제 26 권 제 1 호, pp. 104~109, 2016
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

자력을 이용한 비접촉식 박판 가진장치 개발에 관한 연구

Study on the Development of Noncontact Vibration Exciter for Thin Plates Using Magnetism

허 관 도*·손 인 수†

Kwan-Do Hur and In-Soo Son

(Received December 21, 2015 ; Revised January 15, 2016 ; Accepted January 15, 2016)

Key Words : Noncontact Vibration Exciter(비접촉 가진장치), Thin Plates(박판), Magnetism(자력), Forced Vibration (강제진동), Micom(마이컴)

ABSTRACT

The noncontact vibration exciter system using the electro-magnet for a thin plate is studied in this paper. Based on the Euler-Bernoulli beam theory, the equation of motion of thin plate is derived. The main purpose of this experiment is to match the input-frequency and response frequency of thin plate. The test equipment is configured to vibrate on both sides of the thin plate using the electro-magnet. Two frequencies(input frequency and response frequency) in our experiments show very good agreement. This study results will contribute to basic investigate of an alternative air-knife system for the steel industry.

1. 서 론

현재 철강산업의 주요부문인 강판제조업체에서는 강철판의 기능향상을 위하여 연속도금라인 설비를 갖추고 있다. 이 연속도금라인에서 용융도금강판의 박부착 작업은 세계적으로 큰 이슈가 되고 있다. Fig. 1은 현재 강판의 도금라인에서 아연도금을 위하여 사용하고 있는 에어나이프(air-knife) 장비의 개략도를 보여주고 있다. 에어나이프의 주요한 역할은 용융 아연이 들어 있는 포트를 강판이 지나면서 러프하게 도금되어지면 이를 원하는 도금 두께로 조절해주는 도금 두께 조절장치이다. 기존 연속 도금라인에 사용하고 있는 도금 두께 조절장치는 대부분 에어나이프 장치를 사용하고 있다. 이 장치는 전량 수입에 의존하고 있으며 고가이지만 다음과 같은 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 먼저 100 dB(A) 이상의 높은 소음이 발생하며, 아연도금 작업 중에 공기와 Zn이 반응하여 ZnO(top dross)와 같은 산화 폐기물이 발생한다. 따라서 이 폐기물의 처리비용 및 환경적인 부분에서도 문제가 되고 있다.

따라서 이 연구에서는 위에서 설명한 도막 두께 조절장치인 에어나이프의 대체장비를 개발하기 위한 기초연구로서 전자석을 이용하여 강판을 비접촉으로 진동시켜 도막두께를 조절할 수 있는 장치를 개발하고자 한다. 비접촉 가진기 개발 및 자기장을 이용하여 축 상에서 비접촉 방식으로 축에 발생하는 진동을 계측하는 방법에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있으며[1], 자력을 이용한 비접촉 가진장치 개발에 대한 연구결과도 꾸준히 발표되어 지고 있다[2,3].

† Corresponding Author ; Member, Mechanical Engineering, Dong-eui University
E-mail : isson92@deu.ac.kr
* Mechanical Engineering, Dong-eui University

‡ Recommended by Editor Hung Soo Kim

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

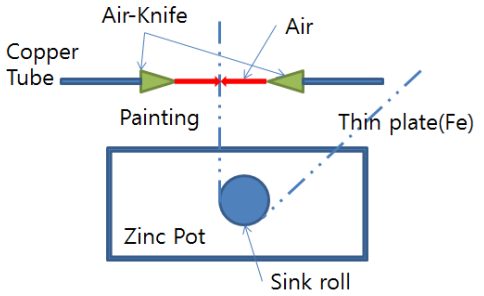


Fig. 1 Air-knife for zinc coating control system

이러한 선행연구의 결과를 참고하여 마그네틱을 이용한 비접촉 가진장치를 개발하고자 한다. 이 연구의 목적은 실험을 통하여 입력 주파수(가진 주파수)에 의하여 대상 박판이 입력 주파수와 동일한 주파수로 응답 주파수를 발생시킬 수 있는 가진 시스템을 개발하고, 나아가 도막 두께를 조절 할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하는 것이다.

2. 강판의 운동방정식

비접촉 가진기 개발에 있어 매우 중요한 부분중의 하나가 바로 비접촉으로 대상물을 가진시켰을 때 외부 가진진동수와 대상 강판의 진폭 및 진동수의 상관관계를 파악하는 것이다. 따라서 대상물의 가로에 비하여 세로의 길이가 비교적 넓은 평판에 적용하기 전에 먼저 얇은 보 형상을 이용하여 두 진동수 사이의 관계를 살펴보기로 한다. 길이 L인 강판 보의 강제진동에 대하여 횡방향(y방향)으로 마그네틱에 의한 외력[4] $F(t)$가 가해질 때 무차원화된 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$[M]\ddot{\boldsymbol{q}}+[C]\dot{\boldsymbol{q}}+[K]\boldsymbol{q}=\boldsymbol{F} \tag{1}$$

여기서 M, C, 그리고 K는 보의 질량, 감쇠, 그리고 강성 행렬을 의미하며, 외력 벡터 $\boldsymbol{F}(\tau)=\bar{\boldsymbol{f}}e^{i\Omega\tau}$이다. 식 (1)에 사용한 무차원 파라미터는 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{\boldsymbol{f}}=f\phi_{nk}(\xi_f),\quad \xi_f=\frac{x_f}{L},\quad f=f_oL^2/(EI),$$
$$\Omega=\omega_fL^2\sqrt{\frac{m}{EI}},\quad i=\sqrt{-1} \tag{2}$$

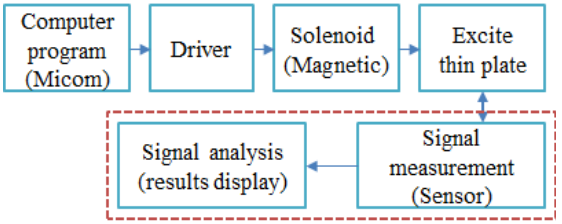


Fig. 2 Schematic diagram of experiment

여기서 x_f는 자력에 의한 가진 위치, ω_f는 외력진동수 그리고 Ω는 무차원 외력진동수, f_o는 외력의 크기를 나타낸다. 따라서 식 (1)에 대한 계의 응답은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\boldsymbol{q}(\tau)=\bar{\boldsymbol{q}}e^{i\Omega\tau} \tag{3}$$

여기서 $\bar{\boldsymbol{q}}$는 보의 무차원 동적응답이다. 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 계의 지배방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left(-\Omega^2[M]+i\Omega[C]+[K]\right)\bar{\boldsymbol{q}}=\bar{\boldsymbol{f}} \tag{4}$$

식 (4)를 이용하여 외력에 의한 전체 시스템의 동적응답을 구할 수 있으며, 이 응답 결과를 바탕으로 실험에 사용할 가진 박판의 치수 및 고유 진동수를 결정하고자 한다.

3. 실 험

Fig. 2는 개발 시스템의 전체적인 구성 및 내용을 간단하게 설명하고 있으며, Fig. 3은 자력을 이용한 비접촉 가진을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 작동원리는 먼저 computer(Micom)에서 프로그램을 이용하여 1, 2번 전자석에 제어입력(전압) 신호를 발생시킨다. 이때 프로그램에 의하여 1, 2번 전자석은 원하는 주파수를 발생할 수 있도록 on/off의 쌍으로 작용하도록 설정한다. 즉, 도금용 강판은 자성체이므로 두 개의 전자석이 on/off의 쌍(혹은 역위상을 갖는 Sine, Cosine 곡선)을 가지면 1, 2번 전자석은 번갈아 강판을 당기는 효과를 가지므로 강판은 진동하게 된다. 원하는 주파수 발생은 on/off 되는 시간을 조절하여 설정한다. Micom에서 제어입력(전압)신호를 받아 driver에서는 전자석을 구동하는 전류 값으로 변환하여 전자석에서는 driver에서

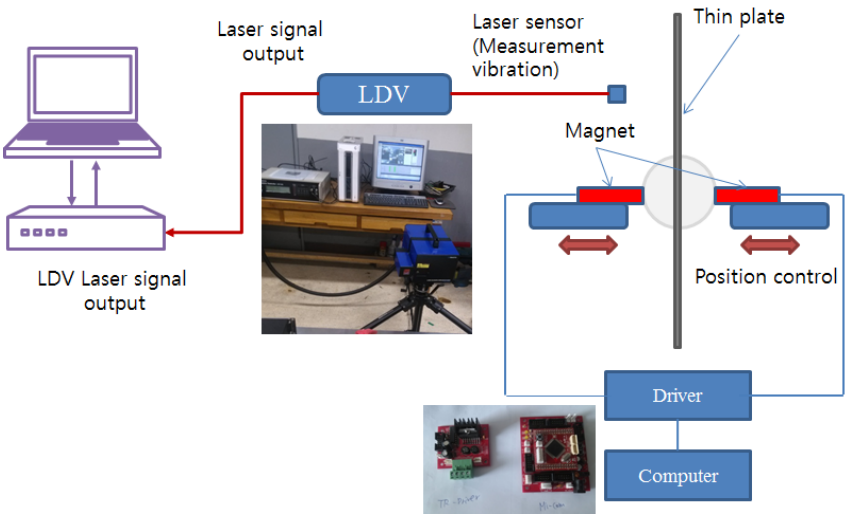


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for noncontact exciter

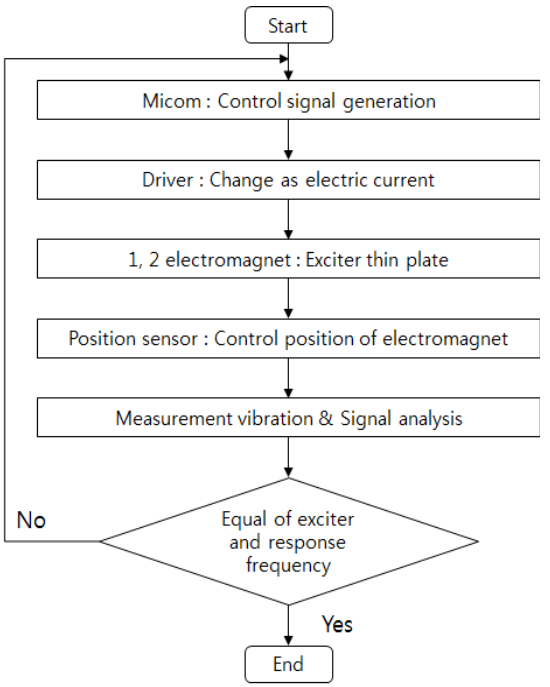


Fig. 4 Flowchart of system

받은 전류 값을 자력으로 변환하여 박강판을 진동시킨다. 마지막으로 원하는 가진 주파수를 부여한 후 레이저 센서를 이용하여 박판의 실제 진동수 및 진폭을 측정하여 입력주파수와의 관계를 파악하도록 한다.

Fig. 4는 개발 시스템의 실험에 대한 흐름도를 나타낸 것으로 초기 마이컴에서 제어 신호를 발생시켜 박판을 가진한 후 가진 주파수와 응답주파수가 일치하도록 알고리듬을 구성한다. 실험 결과는 가진 및 강판의 응답주파수가 일치한 것을 확인한 후 실험값을 획득하도록 하였다.

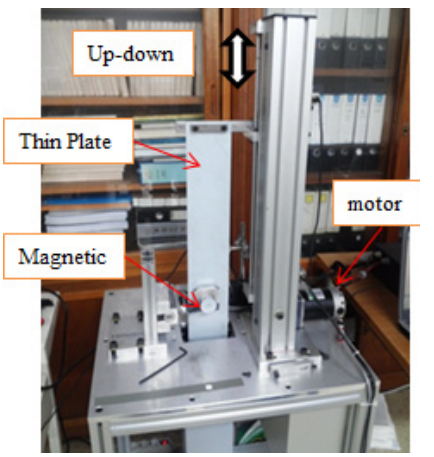


Fig. 5 Experimental setup

Fig. 5는 구성한 실험장치의 모습을 나타낸 것으로, 이 장치를 이용하여 박판 가진 시스템의 개발 가능성 및 완성도를 판단하고자 한다. 실험은 먼저 하나의 전자석을 이용하여 한쪽 박판 면을 가진하는 경우와 양쪽에서 시간차를 두어 양쪽 면을 동시에 가진하는 두 가지 경우에 대하여 실험을 수행하고 그 결과를 고찰하였다. 실험의 초기 목적은 가진 주

파수와 응답주파수의 일치도 이며, 그 다음은 박판 도금의 두께 문제이다. 박판 도금의 두께를 시험하기 위하여 일반 페인트에 약 1분 동안 박판을 담근 후 박판을 가진하여 페인트 두께를 측정하였으며 실험은 5번을 수행하여 그 평균값을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

이 장에서는 2, 3장에서 언급한 이론적 내용 및 실험 결과를 도시하고자 한다. 먼저 시험에 사용할 대상 박판에 대한 치수를 결정하기 위하여 식 (4)를 이용하여 대략적인 강제 진동 특성을 파악하였다.

Fig. 6은 가진 주파수 변화 및 가진 위치에 따른 박판의 횡변위 변화를 나타내고 있다. 여기서 가진 주파수는 1차 고유 진동수 영역($0 \le \Omega \le 16$)으로 설정하였으며, 박판의 응답은 보의 중앙(ξ=0.5)의 변위크기를 나타낸다. 이 결과에서 확인할 수 있는 것처럼 가진 주파수가 1차 고유 진동수(Ω=8.57)에 근접하면 박판의 응답 크기가 매우 커지며 가진 주파수가 1차 고유 진동수에서 멀어지면 그 크기가 다시 감소하는 경향을 보인다. 가진 위치가 박판의 중앙부분에 위치할 때 응답은 가장 크며, 중앙부에서 멀어질수록 응답은 감소한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 결정한 치수의 박판에 대한 고유 진동수 확인을 위하여 유한요소 해석을 수행한 결과를 나타낸 것으로 1차 고유 진동수는 약 50.32 Hz를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Figs. 8~10은 박판을 가진한 후 도막의 두께를 측정한 시험 결과를 도시한 것으로 case I과 case II는 각각 박판의 한면 가진과 두면을 동시에 가진하는 경우를 각각 의미한다.

Fig. 8은 한 쪽 면만을 50 Hz의 가진 주파수로 가진한 시험에 대한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 살펴보면 50 Hz의 가진 주파수에 대하여 박판의 응답 주파수는 약 49 Hz로 진동하고 있으며 그 크기는 약 0.32 mm로 가진되고 있음을 알 수 있다. 두 번째 나타나는 피크치는 동기 주파수에 의한 결과이며 비교적 진폭은 작은 값을 가진다. Fig. 8(b)는 50 Hz의 가진 주파수에 의한 시험 후에 박판 도금의 두께를 도시한 것으로 두께의 측정은 중앙부분을 절단하여 SEM 촬영을 통하여 측정하였다. 그 결과 가진 방향으로는 약 103.45 μm, 반대쪽은 약 244.78 μm 의

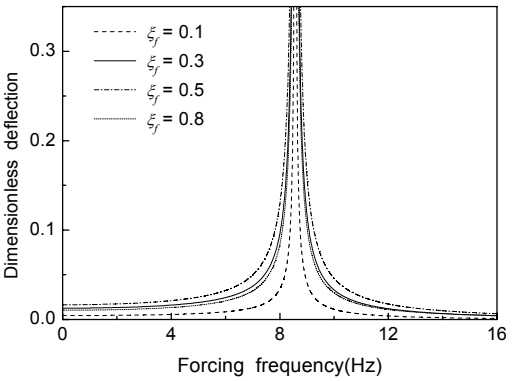


Fig. 6 Effect of location of forcing frequency on deflection response

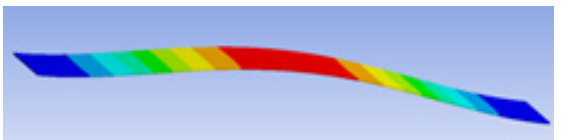
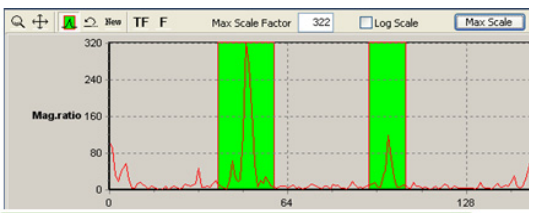
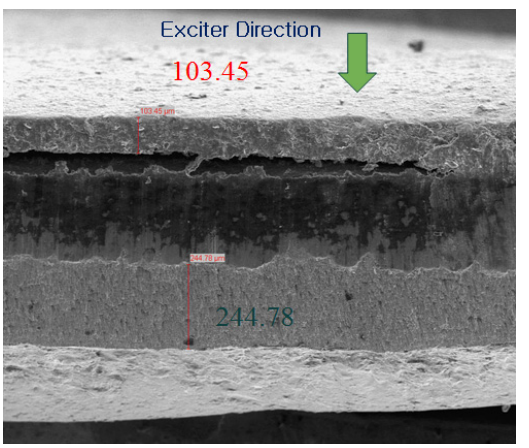


Fig. 7 Result of FEM(1st mode 50.32 Hz)



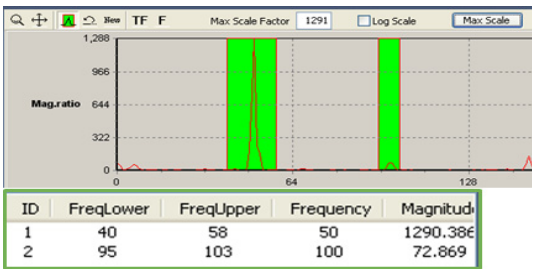
ID	FreqLower	FreqUpper	Frequency	Magnitud
1	39	59	49	321.828
2	93	106	100	118.224

(a) Response frequency of plate

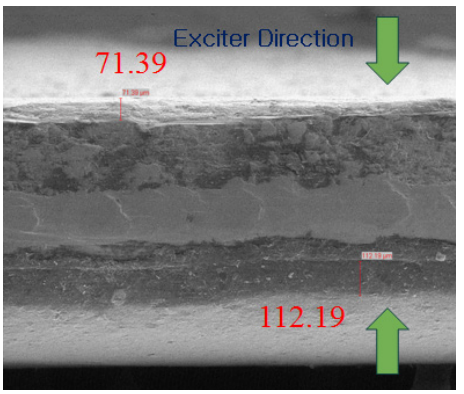


(b) Thickness of painting

Fig. 8 Result of experiment(case I)

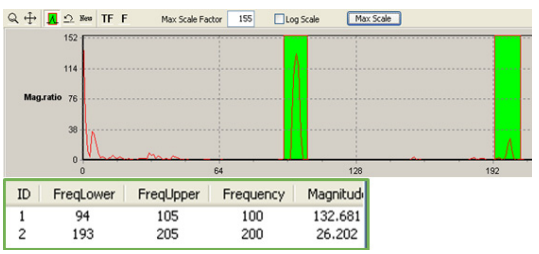


(a) Response frequency of plate

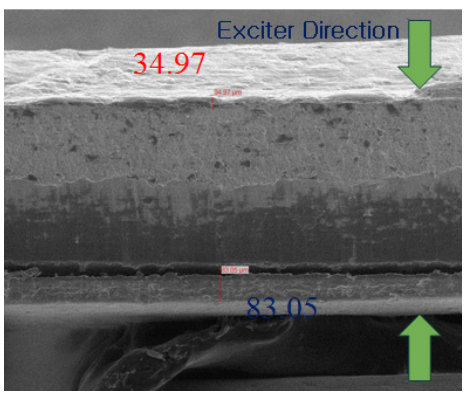


(b) Thickness of painting

Fig. 9 Result of experiment(case II ; 50 Hz)



(a) Response frequency of plate



(b) Thickness of painting

Fig. 10 Result of experiment(case II ; 100 Hz)

도금 두께를 보인다. 총 5번의 실험을 통하여 가진 방향의 두께 평균은 약 102.32 μm의 결과를 얻었다.

Fig. 9는 두 번째 실험으로 박판의 양쪽 면을 모두 50 Hz의 주파수로 가진한 경우의 시험결과를 보여주고 있다. Fig. 9(a)에서 가진 주파수와 응답주파수가 모두 50 Hz로 정확히 일치한다는 것을 알 수 있다. 진동의 크기는 약 1.29 mm로 한 쪽에서 가진하는 경우에 비하여 비교적 진폭이 큰 값을 가진다. Fig. 9(b)는 박판 도금의 두께를 나타낸 것으로 두께는 최소 약 71.39 μm를 나타내고 있으며 양 쪽의 두께가 동일한 값을 가지지는 않는다.

Fig. 10은 박판의 양쪽 면을 모두 100 Hz의 주파수로 가진 한 경우의 시험결과로 1차 고유 진동수(50 Hz)로 가진하였을 경우 진폭이 비교적 크기 때문에 동기주파수를 고려하여 100 Hz로 가진하였다. 결과에서 알 수 있는 것처럼 박판의 진폭은 매우 작아 졌으며 최소 박판 도금의 두께도 약 34.97 μm로 50 %이상 얇아 졌다는 것을 알 수 있다. 5회 실험을 수행하여 구한 결과의 평균 두께는 약 35.71 μm를 보인다. 실험결과에서 확인할 수 있는 것처럼 가진 주파수에 대한 응답주파수는 정확하게 일치하였으나, 양쪽 박판 면의 도막 두께는 일정하지 않다는 단점을 보였다.

5. 결 론

이 연구에서는 강판의 연속도금라인에서 도막 두께 조절장치인 에어나이프의 대체장비를 개발하기 위한 기초연구로 자력을 이용한 비접촉 가진 장치를 개발하고자 한다. 실험을 통하여 초기 입력 주파수에 대한 박판의 출력(응답) 주파수의 상관관계를 실험을 통하여 분석하였으며, 2개의 자석을 이용하여 입력대비 출력 주파수가 거의 정확하게 일치하고 있음을 확인하였다.

향후 동기주파수의 처리방법 및 보다 정확한 시험결과를 위한 장치를 설계하여 진폭 및 가진 위치에 의한 입출력 주파수 변화에 대한 연구를 수행하고자 한다. 또한, 가진 위치 및 가진기와 박판 사이의 거리 조절 등을 통하여 양 방향의 도막 두께를 일정하게 유지할 수 있는 방안에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2015학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2015AA112).

References

(1) Lee, H. C., 2011, Experimental Verification of Mode-selectivity and Effects of Parameters on Outputs in a Noncontact Vibration Exciter for a Shaft, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 10, pp. 924~933.

(2) Son, I. S., Kim, M. S. and Jeong, Y. S., 2013, Development of Noncontact Vibration Exciter Using Magnetism, Proceeding of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 363~364.

(3) Son, I. S., Jeong, Y. S., Kim, M. S. and Hur, K. D., 2013, Response Characteristics of Beam with Noncontact Excitation, Proceeding of the KSME Annual Spring Conference, pp. 254~255.

(4) Zheng, H. and Zeng, H., 2004, Influence of Permanent Magnets on Vibration Characteristics of a Partially Covered Sandwich Cantilever Beam, Journal of Sound and Vibration, Vol. 274, No. 3-5, pp. 801~819.

Kwan-Do Hur received the B.S. degree, M.S. degree and the Ph.D. degree from Pusan University, Korea in 1980, 1982 and 1995, respectively. His research interests are stability of elastically re-strained valve-pipe system with crack.

In-Soo Son received the B.S. degree, M.S. degree and the Ph.D. degree from Dong-eui University, Korea in 1999, 2001 and 2005, respectively. His research interests are dynamic behavior and stability analysis of mechanical systems, and identifying damages in beam-structures.