

진동형 볼피더의 가진력 해석과 적용

오석규*, 배강열*,#

*경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과

Analysis of Excitation Force and its Application in Vibratory Bowl Feeders

Seok-Gyu Oh*, Kang-Yul Bae*#

*Department of Mechatronics Engineering, GJUST

(Received 03 August 2020; received in revised form 21 August 2020; accepted 22 August 2020)

ABSTRACT

Vibratory bowl feeders are widely utilized to align and feed the parts stacked inside the bowl of a feeder. The electro-magnetic force of the electromagnet in a bowl feeder generates the excitation force for the bowl to vibrate in both the horizontal and vertical directions to continuously feed the parts on the track. The feed rate of the part depends on the associated displacement in each direction during the vibration. Therefore, the excitation force induced by the electromagnet should be estimated in advance to ensure the suitable design of the bowl feeder. In this study, a theoretical solution was developed to calculate the electro-magnetic force of the electromagnet for a bowl feeder. Using the proposed solution, the electro-magnetic forces corresponding to a variation in the input parameters of the electromagnet, such as the voltage, frequency, and air gap, could be obtained. The force values obtained using the theoretical solution exhibited a satisfactory agreement with the results obtained using the finite element method, thereby demonstrating the validity of the approach. Subsequently, the bowl displacements were analyzed using the motion equation for the bowl feeder when the theoretically obtained excitation force were applied to vibrate the feeder. The correlation between the vertical displacements of the bowl and input parameters of the electromagnet could be obtained.

Key Words : Vibratory Bowl Feeder(진동형 볼 피더), Electromagnet(전자석), Excitation Force Analysis(가진력 해석), Finite Element Method(유한요소법), Vertical Displacement(수직 변위)

1. 서 론

자동조립시스템에서는 부품이 특정 방향성과 이송률을 갖고 하나씩 연속적으로 이송하게 하는 진동형 피더(feeder)가 광범위하게 활용되고 있다^[1]. 진동형 볼피더가 대표적 사례로, 전자, 제약, 기계

산업 등의 조립시스템에서 다양한 형태로 사용되어, 부품의 이송, 선별, 방향선택 등의 기능을 하게 된다^[2]. 진동형 볼피더의 한 형태를 Fig. 1에서 보여 주고 있다^[3]. 볼피더는, 내부에 트랙을 갖고 부품을 공급하기 위한 볼(bowl), 베이스와 볼 사이에 조립되어 볼을 지지하는 판스프링(leaf spring), 판스프링을 통해 볼을 지지하는 베이스(base), 베이스를 지지하고 진동을 흡수하는 고무발(rubber foot)과 바닥판(support plate) 등으로 구성된다. 베

Corresponding Author : kybae@gntech.ac.kr
Tel: +82-55-751-3384, Fax: +82-55-751-3389

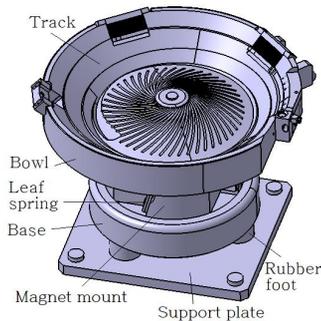


Fig. 1 Schematic view of vibratory bowl feeder

이스 위의 자석고정부(magnet mount) 사이에는 볼에 흡인력(attraction force)을 가하는 전자석(electromagnet)이 설치되어 있다. 이는 상부코어와 하부코어로 구성되며, 코일이 감긴 하부코어가 베이스 위에 위치하고, 상부코어는 볼의 밑바닥에 고정 형태로 부착되어 있다. 코일에는 일정 주파수의 교류 전원이 가해지는 바, 상부코어를 당기는 전자기력은 주기성을 갖는 가진력(excitation force)이 된다. 일정 각도로 경사진 판스프링은 흡인력에 의한 볼의 변위를 제약하면서 동시에 굽힘 변형을 받게 된다. 판스프링의 굽힘과 복원에 의해 볼은 상하와 좌우로 변위하게 되고, 이에 기인하여, 볼 내의 부품은 볼 가장 자리의 경사진 트랙을 따라 미끄럼과 점프 등의 운동으로써 출구로 이동을 하게 된다^[3]. 부품 이동은 다음 공정과 동기가 필요하므로 볼피더 설계에서는 적합한 부품 이송률 범위의 선정이 필요하게 된다^[1]. 부품의 이송률과 볼의 운동과는 밀접한 관계가 있고, 볼의 운동은 전자석의 가진력에 의해 결정된다고 할 수 있다^[4,5]. 따라서 볼피더의 운동해석과 설계에서는 가진력이 되는 전자기력의 크기를 산출하는 것이 선행되어야 한다. 볼피더의 이론적 운동해석에서 전자기력은 특정 크기로 설정하거나^[6], 전류와 갭의 크기로써 추정된 결과를 적용하고 있다^[7]. 전자기력 대신에, 볼의 변위를 측정하고, 변위 조화함수를 가정하여 운동해석에 적용하고 있다^[2,4]. 최근 전자기력을 규명한 이론적 연구가 진행된 바 있으나, 변수의 고려와 결과의 검증이 미흡하였다^[3]. 한편, 전자석 구동기에 대한 전자기력 해석에 관한 연구가 수행되어 왔으나^[8-10], 코어 및 코일 자

체의 인덕턴스가 고려되지 않았고, 전류가 공극(air gap) 변화에 따라 변화되는 점을 고려하지 않았다.

본 연구에서는 볼피더 전자석의 가진력을 산출할 수 있는 이론해를 제안하였다. 이는, 상부와 하부코어 사이의 공극에 의한 인덕턴스와 하부코어의 자체 인덕턴스를 중첩한 인덕턴스 계산법을 적용하고, 전류가 공극에 따라 변화되는 점을 고려하여 유도하였다. 제안된 이론해의 타당성은 전자기장 유한요소해석 프로그램^[11]을 활용하여 검증하였다. 이와 같은 과정에서 공급 전원의 전압과 주파수, 그리고 코어 간 공극의 크기에 따라 가진력의 크기 변화를 규명하고자 하였다. 볼피더에 대한 운동방정식과 이론해로 산출된 가진력을 볼의 운동해석에 적용하여, 가진력과 볼 변위의 관계를 도출하였다.

2. 볼피더의 가진력과 운동 모델

2.1 전자석 모델

해석 대상인 전자석 모델의 형상과 크기는 Fig. 2에서 보여 주고 있다. 하부코어(E형)와 상부코어(I형)로 구성된 EI형이고, 코어 사이에는 공극이 존재하게 된다. 코일은 하부코어의 중앙에 감겨져 있으며, 권선의 중심부는 폭 방향 28 mm와 두께 방향 30 mm의 크기를 갖고, 세로 26 mm와 가로 7 mm 크기의 사각 단면을 갖는다. 코어의 비투자율은 4000, 코일 권선수는 3000회, 코일 저항은 167.6 Ω이다. EI형의 비교대상인 E형의 전자석은 상부코어가 없고, 하부코어와 코일로 구성된다.

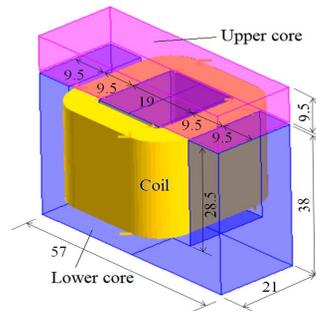


Fig. 2 Configuration of electromagnet

2.2 전자석의 흡인력 해석

전자석의 코일에 전류 i 가 흐르게 되면, 주위에 자계가 발생하고, 자계 중에 축적된 전자기 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다^{9,10)}.

$$W_m = \int_0^i Lidi = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}(Ni)^2R_{eq}^{-1} \quad (1)$$

여기서, N 은 코일 권선 수이며, L 은 코일과 코어 계의 인덕턴스로, 전기장과 자기장을 연계하여 유도하여, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{N^2}{R_1} + L_0 = N^2\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_0}\right) = \frac{N^2}{R_{eq}} \quad (2)$$

여기서, $R_{eq} = \frac{R_0R_1}{R_0+R_1}$ 이고, L_0 는 하부 코어 및 코일만이 존재할 때(E형 전자석)의 인덕턴스이고, R_0 는 이때의 자기저항이다. 한편, R_1 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_1 = \frac{l_i}{\mu_i S}(1 + \mu_s \frac{l_g}{l_i}) = m(1 + n\delta) \quad (3)$$

여기서, $m = \frac{l_i}{\mu_i S}$; $n = \frac{2\mu_s}{l_i}$; $\delta = \frac{l_g}{2}$ 이고, l_i 와 $l_g(=2\delta)$ 는 각각 코어와 공극의 총 길이, δ 는 상부와 하부 코어 사이 공극, μ_i 와 μ_s 는 각각 코어의 투자율과 비투자율, S 는 코어의 단면적을 나타낸다.

전자석은 내부저항(R)과 인덕터(L)로 구성된 직렬 등가회로로 단순화할 수 있고, 이를 해석하면 전자석에 흐르는 전류의 크기를 계산할 수 있다¹²⁾. 코일 내에 흐르는 전류의 실효치(rms)는 $I = V/Z$ 에서 산출할 수 있다. 여기서, V 는 공급 전압의 실효치, 코어와 코일 계의 임피던스 $Z = \sqrt{R_c^2 + (\omega L)^2}$, R_c 는 코일의 전기저항, ω 는 공급 전압의 각주파수이다. 따라서 전압에 대한 위상차를 고려하지 않으면, 코일 내에 흐르는 전류는 $i = \sqrt{2}I_s \sin \omega t$ 로 나타낼 수 있고, 이를 식 (1)에 대입하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$W_m = \frac{1}{2}(Ni)^2R_{eq}^{-1} = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)\left(\frac{N^2}{R_1} + L_0\right)I^2 \quad (4)$$

한편, 가동철심을 가진 전자석에서 전자석이 한 일은 전자석의 전자기에너지와 같고, 전자기력(흡인력)은 전자기에너지를 가동철심의 이동변위로써 미분하여 산출이 가능하다. 전자기력이 작용하는 방향 변위를 δ 로 두면, 전자기력은 자계에너지를 δ 로 미분하여, 즉 $F_d = \frac{dW_m}{d\delta}$ 에서 산출할 수 있다. 여기서, W_m 은 R_1 에 따라 변화되고, R_1 은 δ 의 함수이다. 불피더의 전자석에서 δ 의 크기가 변화함을 고려하여, 전류를 전압과 임피던스 형태로 나타내면, W_m 은 아래와 같이 표현된다.

$$W_m = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)\left(\frac{N^2}{R_1} + L_0\right)\frac{V^2}{R_c^2 + \omega^2(N^2/R_1 + L_0)^2} \quad (5)$$

따라서, 전류도 δ 의 함수임을 알 수 있고, 이를 고려하여 전자기력을 유도해야 함을 알 수 있다.

$$F_d = \frac{dW_m}{d\delta} = \frac{dW_m}{dR_1} \frac{dR_1}{d\delta} \quad (6)$$

(6)식에 (5)와 (3)식을 대입하고 미분하면, 다음과 같은 형태로 전자석의 전자기력(흡인력)을 나타낼 수 있다.

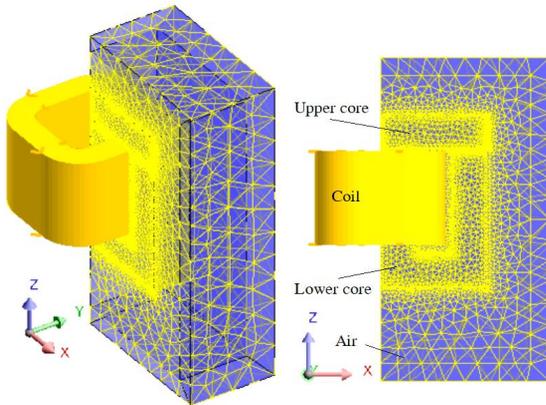
$$F_d = \frac{N^2(1 - \cos 2\omega t)(nm)}{2} \frac{-V^2(R_c^2 + (\omega L_0)^2)R_1^2 - (\omega N^2)^2}{(R_1((R_c^2 + (\omega L_0)^2)R_1 + 2(\omega N)^2 L_0) + (\omega N^2)^2)^2} \quad (7)$$

이와 같은 흡인력이 불을 진동하게 하는 가진력이 되고, 전자석의 제원, 전원의 크기와 주파수 그리고 공극 등에 의해 크기가 결정된다.

2.3 가진력의 유한요소해석

불피더 전자석에 대한 유한요소해석으로, AC 정자기장 3차원해석을 FLUX3D 소프트웨어^[11]를 활용하여 수행하고, 이론해로써 산출한 전자기력 해석 결과를 검증하고자 하였다.

이를 위해 Fig. 3에 보인 바와 같이, 하부와 상



(a) Isometric view (b) Front view

Fig. 3 Solution domain for electro-magnetic FEM analysis of electromagnet

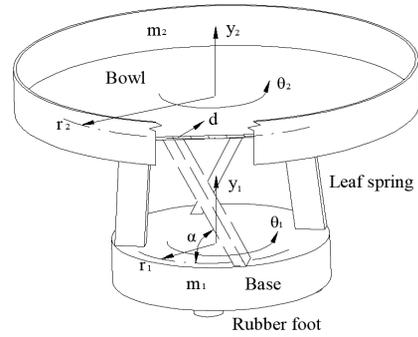
부코어의 좌우(YZ면) 및 전후(XZ면) 대칭성을 고려하여, 전자석 모델의 1/4부분과 공기층을 해석 영역으로 선정하였다. 대칭면에서 자기장은 접선 분포, 전기장은 법선 분포로 설정하였고, 코어는 선형 등방성의 자성을 갖는다고 가정하였다. 공극 주위 코어에는 최소 길이가 0.25 mm인 작은 요소로 나누는 등 해석영역을 사면체 요소 108,100여 개로 나누었다. 코일은 인덕터와 저항 소자의 직렬 연결로 모델링하고, 여기에 실효치 전압과 주파수를 갖는 전원과 접지(GND)를 인가한 전기회로를 구성하였다.

EI형 전자석에 대한 인덕턴스, 전류, 그리고 전자기력 해석을 수행하였다. 상부코어가 없는 E형에 대하여는, 전자석이 갖는 인덕턴스와 코일에 흐르는 전류를 해석하였다.

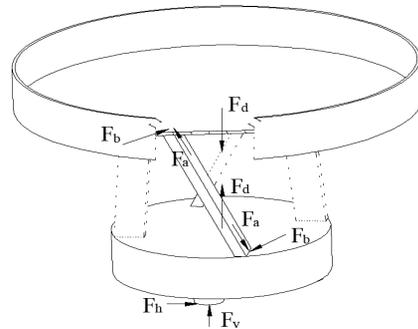
2.4 가진력을 적용한 볼의 운동해석

제안된 가진력을 적용하여 볼의 변위 등 운동해석을 수행하였다. 이를 위해 Fig. 4(a)와 같은 좌표계를 적용하였다^[3]. 질량이 m_1 인 베이스의 운동은 회전축(θ_1)-수직축(y_1)에서 나타내고, 질량이 m_2 인 볼의 운동은 회전축(θ_2)-수직축(y_2)으로 나타내며, 판스프링의 굽힘변위는 d 로 나타내었다.

볼피더 각 요소에 작용하는 하중은 Fig. 4(b)에서 보여 주고 있다. F_d 는 전자석에 의한 가진력,



(a) Base and bowl coordinates systems



(b) Electro-magnetic and reaction forces

Fig. 4 Schematic drawing for analyzing the motion of vibratory bowl feeder

F_a 는 판스프링의 축방향 하중, F_b 는 판스프링의 굽힘 하중, 그리고 F_h 와 F_v 는 각각 고무발의 수평 및 수직 지지력을 나타낸다.

볼피더 운동은 베이스와 볼에 운동방정식을 각각 수립하고, 베이스와 볼의 기하학적 관계를 이용하여, 두 방정식을 결합하여 해석할 수 있다^[3,7].

한편, 볼과 베이스의 기하학적 관계에서, 볼 변위는 베이스 변위와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$y_2 = y_1 + d \cos \alpha ; \theta_2 = \theta_1 + \frac{d}{r_2} \sin \alpha \quad (8)$$

이 관계를 볼의 운동방정식에 대입하면, 볼 운동을 베이스 운동의 형태로 나타내어, 베이스 변위에 대한 통합된 미분방정식으로 유도된다. 최종적으로 볼피더의 운동방정식은 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다^[3,7].

$$M\ddot{Y} = -KY - B\dot{Y} + UF_d \quad (9)$$

여기서, M 은 관성 매트릭스, K 는 강성 매트릭스, B 는 감쇠 매트릭스, U 는 입력 벡터이고, $Y \equiv [y_1; \theta_1; d]$ 이다. 운동방정식에서는 가진력이 입력이 되고, 베이스의 변위, 속도, 가속도 등 운동의 결과가 얻어지게 된다. 볼의 변위는 방정식 (8)에서 산출될 수 있고, 이를 통해 볼의 변위와 가진력의 관계를 규명할 수 있게 된다.

3. 볼피더의 가진력과 운동 해석

전자석의 이론해석에서는, 실효값 전압 220 V와 주파수 40 Hz 전원이 공급된 경우, 하부코어 및 코일의 인덕턴스(L_o)를 고려하지 않는 경우와 고려한 경우의 각각에 대하여 EI형 전자석의 인덕턴스를 산출하고, 유한요소해석의 인덕턴스 해석 결과와 비교하였다. 또 두 경우에 대한 전류해석의 결과도 유한요소해석에 의한 전류해석 결과와 비교하였다.

전자석에 대한 이론해석을 통해, 전자석 공급전압의 실효치를 100~220 V, 공급전압의 주파수를 40~70 Hz, 그리고 상부와 하부코어 사이의 공극을 0.05~1 mm 변화함에 따른 가진력과 실효치 전류를 계산하고자 하였고, 유한요소해석을 통해 계산 결과를 검증하였다.

Table 1 Design parameters of bowl feeder

Parameter	Value(unit)
Mass of base, m_1	4.6 kg
Mass moment of inertia of base, J_1	9000 kgmm ²
Leaf spring angle relative to horizontal, α	75 °
Radius of rubber foot center, r_0	50 mm
Radius of leaf spring connection at bowl, r_2	45 mm
Mass of bowl, m_2	2.1 kg
Mass moment of inertia of bowl, J_2	7000 kgmm ²
Radius of leaf spring connection at base, r_1	47 mm

운동해석 대상인 볼피더는 Table 1에 나타난 제원을 가지고 있다. 운동해석은 가진 시작 직후부터 0.05초 동안을 대상으로 수치해석을 통해 수행하였고, 해석 시간 간격 수는 3072으로 설정하였다. 전자석의 공극 변화, 가진 전압의 진폭 변화와 주파수 변화에 따라 볼의 운동을 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 제안된 이론해석과 유한요소해석으로써 인덕턴스와 전류에 대한 해석 결과를 각각 보여 주고 있다. 특히, 코어 간의 간격이 변화되면 인덕턴스가 변화하게 되고 이로 인해 코일에 흐르는 전류 크기가 변화하게 되는 현상을 나타내고 있다. 해석 대상인 전자석 모델(EI형)에 대해 일반적으로 인덕턴스는, 방정식 (2)에서 나타난 R_0 의 고려 없이, 자기저항 R_1 만을 고려한 형태로 유도되고 있다^[8-10]. 전자석해석에, 이와 같은 인덕턴스(Inductance1)를 적용하면, 코어 간의 공극이 20 mm만큼 크게 될 때, 인덕턴스가 거의 0에 근접하는 결과를 얻게 된다. 이는 하부(E)코어와 코일 자체가 가진 인덕턴스를 반영하지 못한 결과이다. 제안된 식(2)에서는, 하부(E)코어와 코일에 의한 인덕턴스(L_o)를 포함하고 있다. L_o 는 이론해나 측정 등으로 구할 수 있으나, 본 연구에서는 유한요소해석으로 구한 크기인 1.4 H를 적용하였다. 제안된 식(2)의 활용 결과, 이론해에 의해 산출된

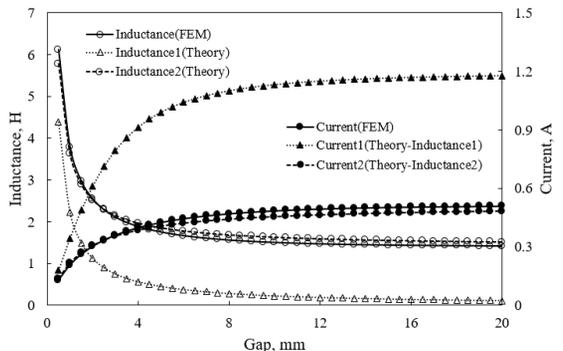


Fig. 5 Changes of inductance and current with gap size between upper and lower cores

EI전자석의 인덕턴스(Inductance2)와 유한요소해석에 의한 인덕턴스의 크기가 매우 유사하게 얻어짐을 알 수 있다. 한편, 이를 통한 전류(Current2) 해석의 결과도 유한요소해석에서 유사하게 얻어짐을 알 수 있고, 인덕턴스(L_o)를 고려하지 않은 경우, 전류(Current1)는 2배 이상 더 크게 예측되고 있음을 알 수 있다.

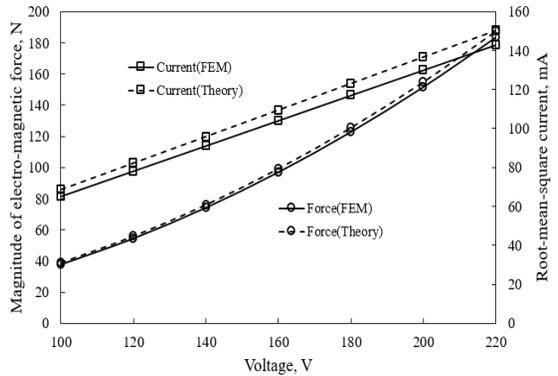
Fig. 6에서는 이론해석과 유한요소해석을 통해 구한 가진력 진폭과 실효치 전류를 각각 보여 주고 있다. Fig. 6(a)는 0.5 mm 공극을 가진 전자석에 인가하는 40 Hz 주파수 전압이 100 V에서 220 V까지 변화될 때의 전자기력(가진력)과 전류를 나타내고 있다. 이론해석의 결과, 전압의 증가에 따라, 전자기력은 38.7 N에서 187.3 N까지 완만한 포물선 형태로 증가하고, 유한요소해석결과와 거의 유사하게 나타나고 있다. 전류는 68.4 mA에서 150.5 mA로 선형적으로 증가하고 있고, 유한요소해석 결과는 다소 낮게 나타나고 있다.

Fig. 6(b)는 0.5 mm 공극을 가진 전자석에 인가한 200 V 전압의 주파수 변화에 따른 예측 결과이다. 주파수가 40 Hz에서 70 Hz까지 변화할 때, 전자기력은 약 154.8 N에서 51.9 N으로 포물선 형태로 감소하는 것으로 나타났다. 유한요소해석 결과는 이론해석의 결과와 매우 유사한 크기를 나타내었다. 전류는 136.8 mA에서 78.5 mA로 선형적 형태로 낮아지고, 유한요소해석 결과는 이론의 결과보다 다소 낮게 나타나고 있다.

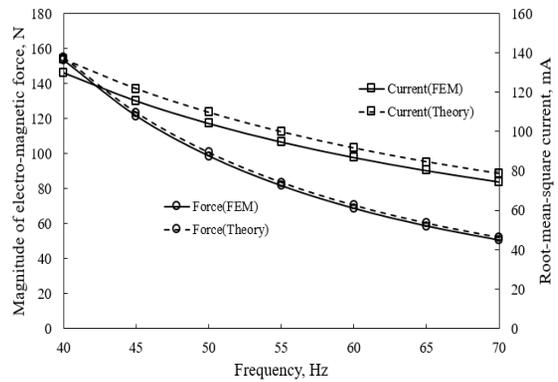
Fig. 6(c)는 200 V와 40 Hz의 전압이 인가된 전자석에서 공극의 크기 변화에 따른 전자기력과 전류의 변화를 보여주고 있다. 공극이 0.05 mm에서 1 mm까지 변화하면, 전자기력은 약 252.5 N에서 103.2 N으로 줄어들고 있고, 전류는 22.2 mA에서 216.1 mA까지 완만한 포물선 형태로 증가하고 있다. 유한요소해석의 결과도 다소의 차이는 보이나 이론해석과 유사한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 7에서는 제한된 전자기력 이론해를 볼피더의 운동해석에 적용하여, 전자석의 공급전압, 주파수, 그리고 공극의 변화에 따른 볼의 수직 변위를 도출한 결과를 나타내고 있다.

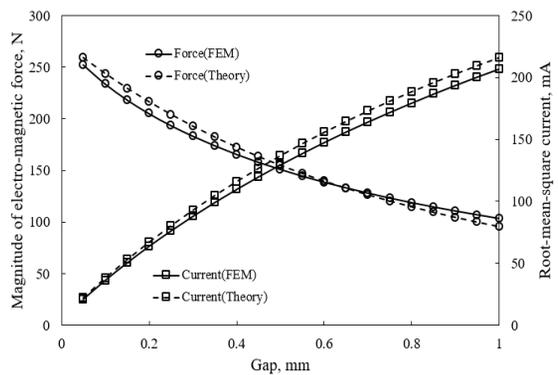
Fig. 7(a)는 공극 0.5 mm를 가진 전자석에 인가한 40 Hz 전압 실효치를 100 V에서 220 V로 변



(a) Voltage



(b) Frequency



(c) Gap

Fig. 6 Changes of electro-magnetic force and current with electro-magnet parameter

화할 경우, 시간에 따른 볼의 수직 변위의 변화를 보여 주고 있다. 전압이 220 V이면, 볼은 -0.024 mm에서 0.01 mm의 크기로 상하 방향으로 진동하

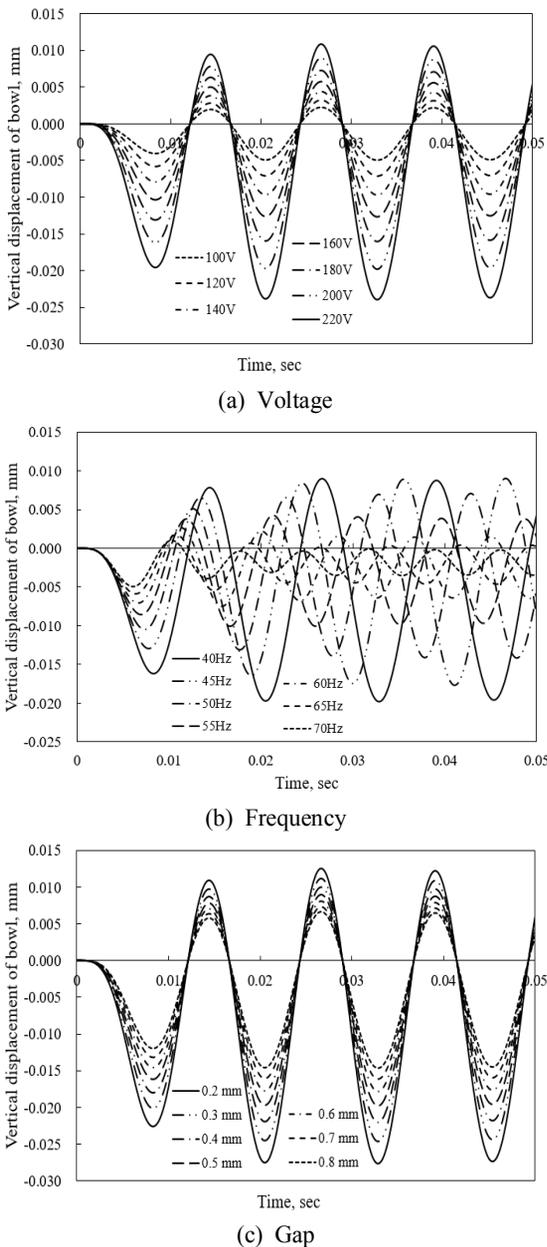


Fig. 7 Vertical displacement of bowl with electromagnet parameter

게 됨을 알 수 있다. 전압이 낮아지면, 진동 진폭은 비례적으로 줄어들고, 전압이 100 V에 이르면, 볼은 -0.005 mm에서 0.0025 mm의 크기로 진동

하는 것을 보여 주고 있다.

Fig. 7(b)는 공극 0.5 mm를 가진 전자석에 공급하는 200 V의 전압의 주파수를 40 Hz에서 70 Hz로 변화한 경우, 시간에 따른 볼의 수직 변위의 변화를 보여 주고 있다. 주파수가 40 Hz인 경우, 볼은 -0.02 mm에서 0.009 mm까지 진동하는 것으로 나타나고, 주파수가 증가하면, 진동폭은 비례적으로 감소하여, 주파수가 70 Hz가 되면, -0.0035 mm에서 0 mm까지의 진폭을 나타내고 있다.

Fig. 7(c)는 220 V와 40 Hz를 갖는 전압이 인가된 전자석의 공극을 0.2 mm에서 0.8 mm로 변화한 경우, 볼의 수직 진동의 진폭 변화를 보여 주고 있다. 공극이 0.2 mm인 경우, -0.028 mm에서 0.012 mm까지의 범위로 진동하는 것으로 나타나고, 공극이 커지면 비례적으로 진폭은 줄어들어, 0.8 mm인 경우, -0.0146 mm에서 0.007 mm의 진동 범위를 나타내고 있다.

5. 결론

진동형 불피더에 적용되는 전자석의 가진력을 이론적 모델로 제안하였다. 제안된 모델을 활용하여, 전자석의 설계 매개변수에 따른 전류와 전자력의 크기를 예측할 수 있음을 보였고, 유한요소 해석을 통해 결과의 타당성을 확인할 수 있었다. 특히, 전압의 증가에 따라 가진력은 완만한 포물선 형태로 증가하였고, 주파수와 공극의 증가에 따라서는 각각 완만한 포물선 형태로 감소하였다. 또한, 전자기력의 이론 모델을 볼의 운동해석에 적용하여, 매개변수 변화에 의한 볼의 운동을 예측할 수 있었다.

후 기

“이 논문은 2020년도 경남과학기술대학교 교원 연구활성화 지원 사업의 예산지원으로 수행되었음.”

REFERENCES

- Jain, A., Bansal, P. and Khanna, P., “Development of a Mathematical Model to

- Predict the Effect of Input Parameters on Tablet Feeding Rate of a Vibratory Bowl Feeder”, *Journal of Production Engineering*, Vol. 22, No.1, pp. 47-51, 2019.
2. Najmi, S., Karimi, A. H., Shadmani, M. and Ziaei-Rad, S., “A New Three-dimensional dynamic model and experimental Validation for Motion of a Part in a Vibratory Bowl Feeder”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 143, pp. 1-14, 2020.
 3. Bae, K.-Y. and Kim, B.-H., “Excitation Model and Motion Analysis of the Vibratory Bowl Feeder”, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, Vol. 10, No. 2, pp. 737-746, 2020.
 4. Boothroyd, G., Poli, C. and Murch, L. E., *Automatic Assembly*, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, Ch. 3 Vibratory Bowl Feeders, 1982.
 5. Kim, S.-C., Kim, H.-N. and Kwon, D.-H., “A Study on the Vibration Characteristics for Parts Feeder”, *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 5, No. 1, pp. 17-26, 1996.
 6. Sturm, M. and Pesik, L., "Determination of a Vibrating Bowl Feeder Dynamic Model and Mechanical Parameters", *Acta Mechanica et Automtica*, Vol. 11, No. 3, pp. 243-246, 2017.
 7. Maul, G. P. and Tomas, M. B., "A Systems Model and Simulation of the Vibratory Bowl Feeder", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 16, No. 5, pp. 309-314, 1997.
 8. Castro, H. F., Furtado, R. M., Cavalca, K. L., Pederiva, R., Butzek, N. and Nordmann, R., “Experimental Performance Evaluation of Magnetic Actuator used in Rotating Machinery Analysis”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 99-108, 2007.
 9. Kwak, D.-Y., “Design of Attraction Type Electromagnet using Magnetic Circuit”, A Thesis for a Master, Sungkyunkwan University, Republic of Korea, 2008.
 10. Lee, S.-B. and Noh, C.-J., “A Study on the Comparison of Attracting Force of AC Solenoid Coil with that of DC Solenoid Coil”, *Journal of Korea Maritime and Ocean University*, Vol. 14, No. 3, pp. 7-13, 1979.
 11. Altair Engineering, Flux3D software, V2018.1.1.
 12. Park, S.-B., *Circuit Theory*, Moonundang, Ch. 2, 1994.