

선형 압축기의 60Hz 진동저감을 위한 연결부 특성의 설계변경 해석

Design of Connecting Part of Linear Compressor to Reduce the Vibration level of 60Hz

전수홍† · 정의봉* · 원성규** · 이효재***

Soo-hong Jeon, Weui-bong jeong, Seong-gyu Won and Hyo-jae Lee

Key Words : Linear Compressor(선형 압축기), Reducing Vibration(진동저감), Vibration Response(진동응답), Equation of Motion(운동방정식), Transmitted Force(전달력)

ABSTRACT

A linear compressor used in a refrigerator has higher energy efficiency than other compressors. On the other hand, its vibration level has still been much severe. Changing the characteristics of connecting parts may reduce the vibration level of linear compressor. The piston, body and shell are assumed to be rigid. These rigid bodies are connected by coil springs and flexible loop pipe. This paper derived the mathematical model by combining the equation of motion of rigid parts and flexible parts. The variation of vibration level according to the change of connecting parts was investigated.

기 호 설 명

m_p : piston의 질량 [kg]
 M_b : body의 질량 [kg]
 M_s : shell의 질량 [kg]
 K_m : main spring의 강성 [N/m]
 K_s : support spring의 강성 [N/m]
 K_g : mount spring의 강성 [N/m]
 y_p : piston의 변위 [m]
 x_b, y_b, z_b : body의 변위 [m]
 x_s, y_s, z_s : shell의 변위 [m]
 u, v, w : loop pipe 요소의 변위 [m]
 $\theta_{bx}, \theta_{by}, \theta_{bz}$: body의 각변위 [rad]
 $\theta_{sx}, \theta_{sy}, \theta_{sz}$: shell의 각변위 [rad]
 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$: loop pipe 요소의 각변위 [rad]
 F : piston과 body에 작용하는 힘 [N]

1. 서 론

압축기는 냉장고의 성능을 결정하는 중요한 장치 중의 하나이다. 따라서 냉장고의 성능을 높이기 위하여 압축기의 연구개발은 꾸준히 계속되어 오고 있다. 지금까지 압축기의 대부분은 회전 모터를 사용하는 방식으로 냉매를 압축해 왔지만, 최근에는 선형 모터를 이용하는 압축기가 연구되고 있다. 선형 압축기는 기존의 회전식 압축기보다 에너지효율이 더욱 뛰어나다는 장점이 있다. 하지만 에너지효율이 좋은 만큼 기존의 압축기보다 진동레벨이 높다는 문제점을 가지고 있다. 효율을 극대화 하면서 진동레벨을 줄이기 위해서는 선형 압축기의 각 연결부의 특성을 변화시켜서 외부에 전달되는 응답의 크기가 줄어들 수 있도록 설계방향을 잡아야 한다. 본 연구에서는 운동방정식을 이용하여 선형 압축기의 수학적 모델링을 수행하고 이를 통해서 만들어진 방정식을 해석하여 각 부위의 진동 응답 레벨을 예측한다. 또한 예측된 진동 레벨을 줄이기 위해서 연결부 특성의 설계변경을 수행하여 최적의 조건을 찾아내고 전달력의 계산을 통하여 최적 조건의 경향을 분석해 본다.

† 교신저자; 부산대학교 대학원 기계공학부

E-mail : jsh4188@pusan.ac.kr

Tel: (051) 510-3088, Fax: (051) 517-3805

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 대학원 기계공학부

*** LG전자

2. 선형 압축기의 수학적 모델링

2.1 선형 압축기의 구조

선형 압축기는 크게 강체와 탄성체 부분으로 모델링을 하였다. 강체 부분은 piston과 body와 shell로 설정하였다. piston은 선형모터에 의하여 직선운동을 하는 부분이다. body는 선형모터의 외부에 해당하며 piston과 함께 냉매의 압축이 이루어지는 부분이다. shell은 body가 자유롭게 운동할 수 있도록 감싸주는 역할을 하며 냉매를 moving part에 공급해준다. 탄성체 부분은 body와 shell을 이어주고 있는 loop pipe로 설정하였다. loop pipe는 body에서 압축된 냉매가 지나가는 관으로써 유연하게 움직이기 때문에 탄성체로 설정하였으며, 유한요소해석을 통하여 운동을 해석하였다. 선형 압축기의 자유 물체도는 Fig.1과 같이 나타내었다.

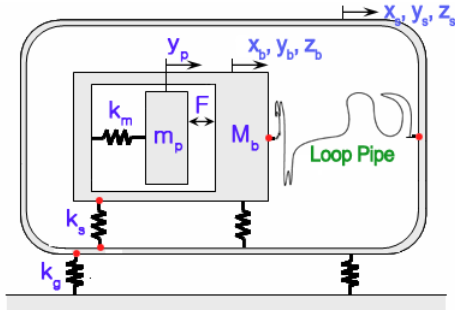


Fig. 1 DOF of Linear Compressor

2.2 강체 part의 모델링

(1) 변환행렬^(4,5)

Fig.2에서 볼 수 있듯이, 병진운동과 회전운동을 가지는 어떤 강체가 존재할 때 강체의 무게 중심에서 어느 정도 떨어진 부분의 변위와 속도 벡터는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

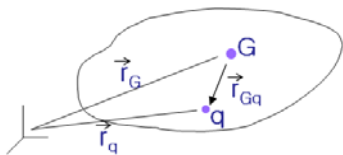


Fig. 2 Transform matrix in rigid body

$$\vec{V}_q = \vec{V}_G + \vec{\omega} \times \vec{r}_{Gq} \quad (1)$$

속도벡터의 성분을 행렬로 나타내면 식(2)와 같다. 이 식을 사용하면 강체 위의 임의의 점에

서의 벡터성분을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_q \\ v_q \\ w_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & z_{Gq} & -y_{Gq} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{Gq} & 0 & x_{Gq} \\ 0 & 0 & 1 & y_{Gq} & -x_{Gq} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_G \\ v_G \\ w_G \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 관성행렬^(1,2,3)

선형 압축기의 piston, body, shell은 하나의 강체 덩어리로 가정하였으므로 질량과 질량관성모멘트를 성분으로 가진다. 이 성분은 식(3)과 같이 kinetic 에너지에 관한 공식을 이용하여 각 부분의 질량과 질량관성모멘트를 속도성분과의 곱으로 구성된 행렬로 조합할 수 있다.

$$K.E = \frac{1}{2} m_p \dot{y}_p^2 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_b & 0 & 0 \\ 0 & M_b & 0 \\ 0 & 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{z}_b \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \theta_{bx} \\ \theta_{by} \\ \theta_{bz} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_{bGx} & -I_{bGxy} & -I_{bGxz} \\ -I_{bGxy} & I_{bGy} & -I_{bGyz} \\ -I_{bGxz} & -I_{bGyz} & I_{bGz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{bx} \\ \dot{\theta}_{by} \\ \dot{\theta}_{bz} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 \\ 0 & M_s & 0 \\ 0 & 0 & M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \\ \dot{z}_s \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \theta_{sx} \\ \theta_{sy} \\ \theta_{sz} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_{sGx} & -I_{sGxy} & -I_{sGxz} \\ -I_{sGxy} & I_{sGy} & -I_{sGyz} \\ -I_{sGxz} & -I_{sGyz} & I_{sGz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{sx} \\ \dot{\theta}_{sy} \\ \dot{\theta}_{sz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) 강성행렬^(1,2,3)

선형 압축기의 강성성분은 강체 사이를 연결하는 스프링의 종방향과 횡방향 강성을 성분으로 설정하였다. 이 성분은 식(4)와 같이 potential 에너지에 관한 공식을 이용하여 연결부 스프링의 강성성분과 변위성분과의 곱으로 구성된 행렬로 조합할 수 있다.

$$P.E = \frac{1}{2} k_m (y_p - y_b)^2 + \frac{1}{2} \sum_i \begin{bmatrix} x_{bi} - x_{si} \\ y_{bi} - y_{si} \\ z_{bi} - z_{si} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{xzi} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yzi} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zzi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{bi} - x_{si} \\ y_{bi} - y_{si} \\ z_{bi} - z_{si} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \sum_k \begin{bmatrix} x_{sk} \\ y_{sk} \\ z_{sk} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{gzk} & 0 & 0 \\ 0 & k_{gzk} & 0 \\ 0 & 0 & k_{gzk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{sk} \\ y_{sk} \\ z_{sk} \end{bmatrix}$$

$$\text{단, } \begin{bmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{bi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{si} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_{sk} \\ y_{sk} \\ z_{sk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{sk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 탄성체 loop pipe의 유한요소 모델링

(1) 질량행렬⁽¹⁾

선형 압축기에서 탄성체는 loop pipe 부분으로써 유한요소해석에서 사용되는 방법을 통하여 식(5)와 같이 운동에너지에 관한 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 면적(A)과 관성모멘트(I), 밀도(ρ)는 해당 요소의 성분이며, a는 요소길이의 1/2을 나타낸다.

$$K.E = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}^T \frac{\rho A a}{3} \begin{bmatrix} 21 & 12 \\ 12 & 12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \theta_{x1} \\ \theta_{x2} \end{bmatrix}^T \frac{\rho I_a}{3} \begin{bmatrix} 21 & 12 \\ 12 & 12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{x1} \\ \theta_{x2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{\theta}_{z1} \\ \dot{v}_2 \\ \dot{\theta}_{z2} \end{bmatrix}^T \frac{\rho A a}{210(1+3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \\ m_2 & m_5 - m_4 & m_6 & \\ m_3 - m_4 & m_1 - m_2 & & \\ m_4 & m_6 - m_2 & m_5 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{\theta}_{z1} \\ \dot{v}_2 \\ \dot{\theta}_{z2} \end{bmatrix} \\
& + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{\theta}_{z1} \\ \dot{v}_2 \\ \dot{\theta}_{z2} \end{bmatrix}^T \frac{\rho I_z}{30a(1+3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_7 & m_8 - m_7 & m_8 \\ m_8 & m_9 - m_8 & m_{10} \\ -m_7 - m_8 & m_{10} - m_8 & \\ m_8 & m_{10} - m_8 & m_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{\theta}_{z1} \\ \dot{v}_2 \\ \dot{\theta}_{z2} \end{bmatrix} \\
& + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{w}_1 \\ \dot{\theta}_{y1} \\ \dot{w}_2 \\ \dot{\theta}_{y2} \end{bmatrix}^T \frac{\rho A a}{210(1+3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_1 - m_2 & m_3 - m_4 \\ -m_2 & m_5 & m_4 & m_6 \\ m_3 & m_4 & m_1 & m_2 \\ -m_4 & m_6 & m_2 & m_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w}_1 \\ \dot{\theta}_{y1} \\ \dot{w}_2 \\ \dot{\theta}_{y2} \end{bmatrix} \\
& + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{w}_1 \\ \dot{\theta}_{y1} \\ \dot{w}_2 \\ \dot{\theta}_{y2} \end{bmatrix}^T \frac{\rho I_y}{30a(1+3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_7 - m_8 - m_7 - m_8 \\ -m_8 & m_9 & m_8 & m_{10} \\ -m_7 & m_8 & m_{10} & m_8 \\ -m_8 & m_{10} & m_8 & m_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w}_1 \\ \dot{\theta}_{y1} \\ \dot{w}_2 \\ \dot{\theta}_{y2} \end{bmatrix} \\
\text{단, } \beta & = \frac{EI_z}{\kappa A G a^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_1 & = 156 + 882\beta + 1260\beta^2, \quad m_2 = (44 + 231\beta + 315\beta^2)a \\
m_3 & = 54 + 378\beta + 630\beta^2, \quad m_4 = (-26 - 189\beta - 315\beta^2)a \\
m_5 & = (16 + 84\beta + 126\beta^2)a^2, \quad m_6 = (-12 - 84\beta - 126\beta^2)a^2 \\
m_7 & = 18, \quad m_8 = (3 - 45\beta)a \\
m_9 & = (8 + 30\beta + 180\beta^2)a^2, \quad m_{10} = (-2 - 30\beta + 90\beta^2)a^2 \quad (5)
\end{aligned}$$

(2) 강성행렬^(1,3)

loop pipe 부분을 운동에너지에 관한 식의 유도와 마찬가지로 유한요소해석에서 사용되는 방법을 통하여 식(6)과 같이 위치에너지를 관한 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 면적(A)과 관성모멘트(I, J), 탄성계수(E, G)는 해당 요소의 성분이며, a는 요소길이의 1/2을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
P.E. & = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}^T \frac{AE}{2a} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \theta_{x1} \\ \theta_{x2} \end{bmatrix}^T \frac{GJ}{2a} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{x1} \\ \theta_{x2} \end{bmatrix} \\
& + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_{z1} \\ v_2 \\ \theta_{z2} \end{bmatrix}^T \frac{EI_z}{2a^3(1+3\beta)} \begin{bmatrix} 3 & 3a & -3 & 3a \\ 3a & (4+3\beta)a^2 & -3a & 3 \\ -3 & -3a & 3 & -3a \\ 3a & (2-3\beta)a^2 & -3a & (4+3\beta)a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \theta_{z1} \\ v_2 \\ \theta_{z2} \end{bmatrix} \\
& + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} w_1 \\ \theta_{y1} \\ w_2 \\ \theta_{y2} \end{bmatrix}^T \frac{EI_z}{2a^3(1+3\beta)} \begin{bmatrix} 3 & -3a & -3 & -3a \\ -3a & (4+3\beta)a^2 & 3a & 3 \\ -3 & 3a & 3 & 3a \\ -3a & (2-3\beta)a^2 & 3a & (4+3\beta)a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \theta_{y1} \\ w_2 \\ \theta_{y2} \end{bmatrix} \\
\text{단, } \beta & = \frac{EI_z}{\kappa A G a^2} \quad (6)
\end{aligned}$$

(3) 감쇠행렬

감쇠성분행렬은 앞서 유도한 loop pipe의 질량성분행렬과 강성성분행렬에 계수를 곱함으로써 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[C]_{lp} = \alpha_{lp} [M]_{lp} + \beta_{lp} [K]_{lp} \quad (7)$$

2.4 강체·탄성체 운동방정식의 결합⁽³⁾

강체와 탄성체의 각 성분행렬들을 따로 유도하였기 때문에 이를 하나로 합쳐주는 작업이 필

요하다. 현재 loop pipe는 local 좌표를 사용하고 있으며, loop pipe의 끝부분은 body와 shell에 연결되기 때문에 식(8)과 같이 변환행렬을 통해서 질량성분행렬을 global 좌표로 바꾸어 주어야 한다.

$$\begin{aligned}
KE & = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\cdot)_1 \\ (\cdot)_{lp} \\ (\cdot)_{Nlp} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\cdot)_1 \\ (\cdot)_{lp} \\ (\cdot)_{Nlp} \end{bmatrix} \\
& = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\cdot)_b \\ (\cdot)_{lp} \\ (\cdot)_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} T_b^T & I & \\ I & T_s^T & \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_b \\ I \\ T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\cdot)_b \\ (\cdot)_{lp} \\ (\cdot)_s \end{bmatrix} \\
& = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\cdot)_b \\ (\cdot)_{lp} \\ (\cdot)_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} T_b^T M_{11} T_b & T_b^T M_{12} & T_b^T M_{13} T_s \\ M_{21} T_b & M_{22} & M_{23} T_s \\ T_s^T M_{31} T_b & T_s^T M_{32} & T_s^T M_{33} T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\cdot)_b \\ (\cdot)_{lp} \\ (\cdot)_s \end{bmatrix} \quad (8)
\end{aligned}$$

global 좌표로 변환된 행렬은 식(9)와 같이 강체부분의 행렬과 더해지면 선형 압축기 전체의 질량성분행렬이 완성된다.

$$\begin{aligned}
K.E_{(STM)} & = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} y_p \\ (\cdot)_b \\ (\cdot)_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_p & M_{pb} \\ M_{bp} & M_b \\ M_{sb} & M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ (\cdot)_b \\ (\cdot)_s \end{bmatrix} \\
& + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\cdot)_b \\ (\cdot)_{lp} \\ (\cdot)_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} T_b^T M_{11} T_b & T_b^T M_{12} & T_b^T M_{13} T_s \\ M_{21} T_b & M_{22} & M_{23} T_s \\ T_s^T M_{31} T_b & T_s^T M_{32} & T_s^T M_{33} T_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\cdot)_b \\ (\cdot)_{lp} \\ (\cdot)_s \end{bmatrix} \\
& = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} y_p \\ (\cdot)_b \\ (\cdot)_s \\ (\cdot)_{lp} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_p & M_{pb} & 0 & 0 \\ M_{bp} & M_b + T_b^T M T_b & M_b + T_b^T M T_b & T_b^T M_{12} \\ 0 & M_b + T_b^T M T_b & M_b + T_b^T M T_b & T_s^T M_{32} \\ 0 & M_{21} T_b & M_{23} T_s & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ (\cdot)_b \\ (\cdot)_s \\ (\cdot)_{lp} \end{bmatrix} \quad (9)
\end{aligned}$$

강성성분행렬과 감쇠성분행렬도 질량성분행렬의 결합방법과 동일한 방법을 이용하여 결합할 수 있다.

2.5 선형 압축기 shell의 임의점 응답^(2,3)

결합된 운동방정식의 질량, 강성, 감쇠성분행렬은 piston과 body에 가해지는 외력성분벡터와 함께 식(10)으로 나타낼 수 있으며 이 방정식을 풀어내어 shell중심의 주파수별 변위응답을 구해낼 수 있다.

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K])\{x\} = \{f\} \quad (10)$$

여기서 구해진 shell중심의 응답은 앞 절에서 언급한 변환행렬을 곱하여 shell 임의점에서의 변위응답을 구할 수 있으며 식(11)과 같이 가속도응답으로 변환이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} a_{xsr} \\ a_{ysr} \\ a_{zsr} \end{bmatrix} = (-\omega^2) \begin{bmatrix} T_{sr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ \theta_{sx} \\ \theta_{sy} \\ \theta_{sz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3. 선형 압축기 연결부 설계변경 해석

3.1 main spring 강성의 변경

선형 압축기의 main spring은 piston과 body를 연결해주는 부분으로 piston의 질량과 함께 60Hz의 고유진동수를 유지하여야 한다. 따라서 main spring의 강성을 변화시킬 때 piston의 질량도 함께 변화시킴으로써 60Hz의 고유진동수를 유지하도록 하였다.

Fig.3은 main spring의 강성을 0에서 현재 값의 2배인 140400 N/m 까지 변화하는 동안의 shell중심의 가속도응답을 나타내고 있다. 강성이 증가함에 따라 가속도응답이 선형적으로 증가함을 확인할 수 있으며, 특히 주 진동방향인 y축 방향의 진동의 변화가 큰 것을 확인할 수 있다.

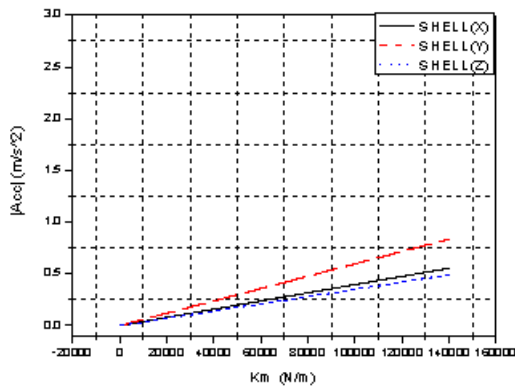


Fig. 3 K_m 값 변화에 따른 shell의 가속도응답

3.2 support spring 강성의 변경

선형 압축기의 support spring은 body와 shell를 연결해주는 부분으로 수직방향과 수평방향으로 강성의 변화를 주었다.

Fig.4는 수직방향의 강성을 0에서 현재 값의 2배인 6370 N/m 까지 변화하는 동안의 shell중심의 가속도응답을 나타내고 있다. 모든 방향에서의 가속도 값의 변화량이 거의 없는 것을

확인할 수 있다.

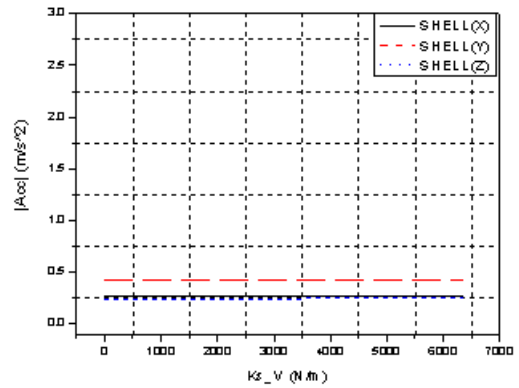


Fig. 4 $K_{s,V}$ 값 변화에 따른 shell의 가속도응답

Fig.5는 수평방향의 강성을 0에서 현재 값의 2배인 2115 N/m 까지 변화하는 동안의 shell중심의 가속도응답을 나타내고 있다. x와 z방향의 가속도응답은 큰 변화가 없으나, y방향의 가속도응답은 특이한 모습을 보이고 있다. 강성이 증가함에 따라 진동레벨이 줄어들다가 다시 증가하는 특이한 모습을 확인할 수 있다.

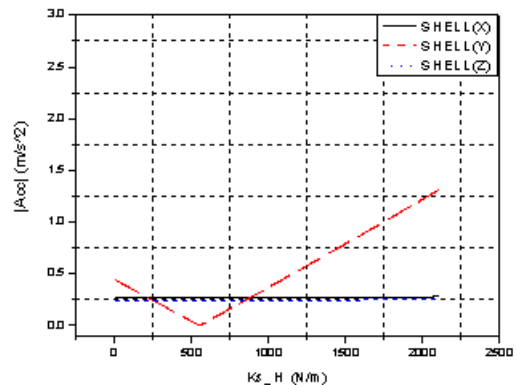


Fig. 5 $K_{s,H}$ 값 변화에 따른 shell의 가속도응답

3.3 mount spring 강성의 변경

선형 압축기의 mount spring은 shell을 ground와 연결해주는 부분이다. mount spring도 support spring과 마찬가지로 수직방향과 수평방향으로 강성의 변화를 주었다.

Fig.6은 수직방향의 강성을 0에서 현재 값의 2배인 5870 N/m 까지 변화하는 동안의 shell중심의 가속도응답을 나타내고 있다. 모든 방향에서의 가속도 값의 변화량이 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

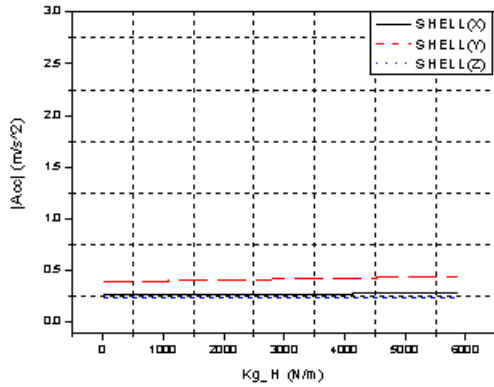


Fig. 6 $K_{g,H}$ 값 변화에 따른 shell의 가속도응답

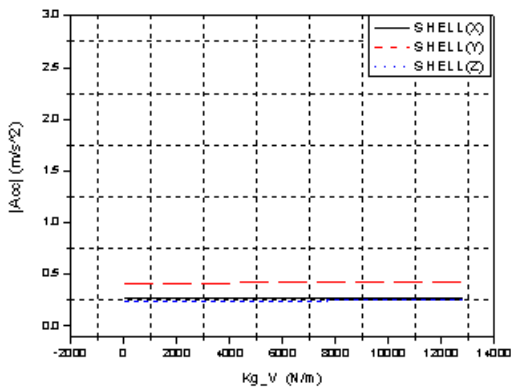


Fig. 7 $K_{g,V}$ 값 변화에 따른 shell의 가속도응답

Fig.7은 수직방향의 강성을 0에서 현재 값의 2배인 5870 N/m 까지 변화하는 동안의 shell 중심의 가속도응답을 나타내고 있다. 모든 방향에서의 가속도 값의 변화량이 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

4. 선형 압축기 강체 사이의 전달력 유도^(1,2)

4.1 piston에서 body로의 전달력

선형 압축기의 piston의 운동에 의해서 발생한 힘은 식(12)와 같이 main spring을 통해서 body로 전달된다.

$$f_y = k_m (x_p - x_b) \quad (12)$$

Fig.8을 살펴보면 가속도응답의 그래프와 같이 전달력과 강성의 변화가 선형적 관계를 유지하면서 증가하는 것을 확인할 수 있다.

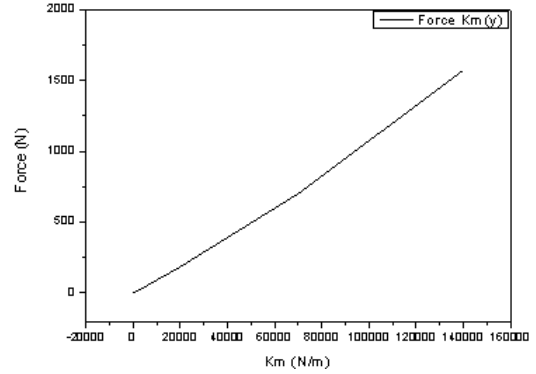


Fig. 8 K_m 에 의한 전달력

4.2 body에서 shell로의 전달력

선형 압축기의 body의 운동에 의해서 발생한 힘은 support spring과 loop pipe를 통하여 shell로 전달된다. loop pipe의 각 방향의 강성은 NASTRAN⁽⁶⁾ 해석 툴을 사용하여 구하였다 전달되는 각 방향의 힘은 식(13)과 같이 body에서의 변위와 shell에서의 변위의 차이로 강성 성분과의 곱으로 구할 수 있다.

$$\{f_s\} = [k_s] \{x_b - x_s\} \quad (13)$$

Fig.9를 살펴보면 support spring을 통한 전달력이 강성을 증가시키에 따라 증가하는 것을 볼 수 있는데 loop pipe에 의해 전달되는 힘과 반대방향으로 작용하는 것을 확인할 수 있다. 이 두 힘을 합하여 그래프를 그리면 가속도응답의 그래프와 비슷한 경향을 보이게 된다.

Fig.10에서는 강성의 변화에 따른 전달력의 변화가 거의 없음을 보여주고 있다.

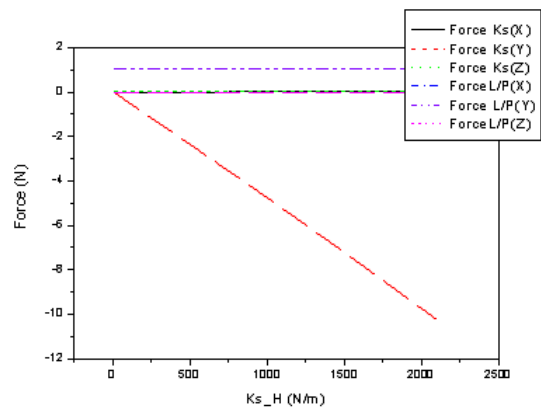


Fig. 9 $K_{s,H}$ 에 의한 전달력

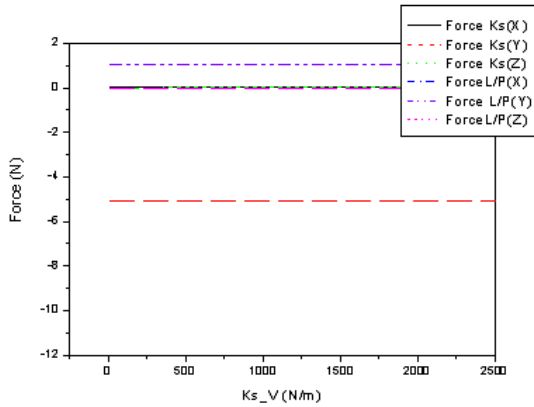


Fig. 10 $K_{s,V}$ 에 의한 전달력

4.3 shell에서 ground로의 전달력

선형 압축기의 body의 운동에 의해서 전달된 힘은 mount spring을 통해서 ground로 전달된다. 식(14)와 같이 mount spring의 강성을 shell에서의 변위와 곱하여 전달력을 구하였다.

$$\{f_g\} = [k_g]\{x_s\} \quad (14)$$

Fig.11과 Fig.12에서도 강성의 변화에 따른 전달력의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 구했던 가속도응답 그래프와 비교하여 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

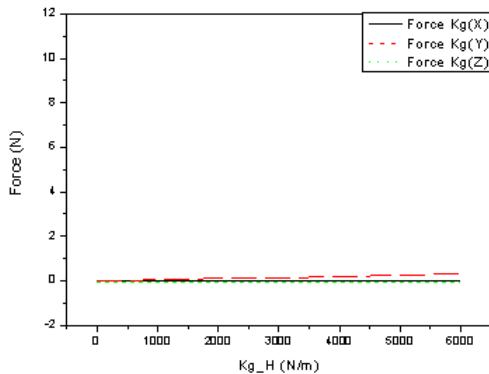


Fig. 11 $K_{g,H}$ 에 의한 전달력

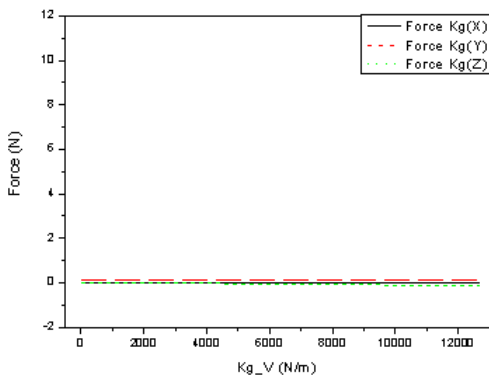


Fig. 12 $K_{g,V}$ 에 의한 전달력

5. 결론

선형 압축기의 진동레벨 저감을 위하여 운동 방정식을 통하여 수학적 모델링을 하였고 이를 바탕으로 최적화된 모델을 찾기 위하여 강체 간 연결부의 설계변경 응답을 계산해 보았다. 계산 결과 중에 main spring과 support spring의 강성을 변화시켰을 때 가속도응답의 변화가 컸으며, 이들의 강성을 줄임으로써 진동레벨을 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 이 중에서 support spring은 강성을 줄이다보면 진동레벨이 다시 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향의 원인을 알아보기 위하여 강체 사이의 전달력을 구해보았다. body와 shell사이에 전달되는 힘은 support spring과 loop pipe를 통해서 전달되는데 전달력의 방향이 반대로 작용하여서 서로 힘이 상쇄되는 지점이 존재하였다. 이런 현상으로 인하여 진동레벨의 기울기가 변하는 경향을 보였던 것임을 알 수 있었다. 앞으로 이 연구를 이용하여 선형 압축기의 진동레벨 저감에 최적화된 모델을 설계하는데 큰 도움이 될 것이다.

참고 문헌

- (1) M. Petyt, 1990, "Introduction to finite element vibration analysis," Cambridge University.
- (2) S. S. Rao, 1995, "Mechanical Vibrations," forth edition, Addison-Wesley.
- (3) 전수홍, 정의봉, 이효재, 2007, "리니어 압축기의 동적거동예측 Simulation Tool 개발," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집.
- (4) K. J. Waldron and G. L. Kinzel, 1999. "Kinetics, Dynamics, and Design of Machinery," Wiley.
- (5) Yoo. W. S., Lee, B. H., Lee, S. B., Park, N. K. and Jeong, W. B., 2000, "Dynamics," MoonWoonDang.
- (6) M. P. Miller, 2003 "Getting Started with MSC/NASTRAN," MacNeal-Schwendler Corporation.