

원형코일형 선형모타에서의 충격입력에 의한 가동자 표면응력

- Stress acting on surface of the sleeve in tubular type linear motors due to pulsed input -

김기봉  
삼성전기 전동연구실

**Abstract** - Tubular coils are widely used in various electromagnetic applications. For the purpose to obtain the mechanical output power, one of the two sets of coil arrays, called drive, is generally fixed while the other, called sleeve or projectile, is not fixed and easy to move. Among the three force components acting on the coil arrays, the radial one used to affect as a stress on the surface of the sleeve, or a restoring force if it is off-centered. The system under transient state or intended pulsed input power is likely to have the worst condition in mechanical stress, and it is necessary to design the mechanical strength of the sleeve within the permanent deformation limit. This paper is focused on the presentation of analytic expressions for the stress on surface of the sleeve.

2. CONFIGURATION

일반적으로 drive 와 sleeve 의 구조에서 볼때, TLM type linear elevator, pipe liner, linear levitationer 등에서와 같이 주로 알루미늄으로 된 2차 도체 축을 따라 coil array 를 가진 drive 가 움직이도록 된 형태와 actuator, launcher 등에서와 같이 coil array 로된 drive 축을 따라 주로 알루미늄으로 된 sleeve 가 움직이는 형태로 구분된다. 본 논문에서는 그림 2-1 과 같은 구조의 TLM 을 모델로 한다.

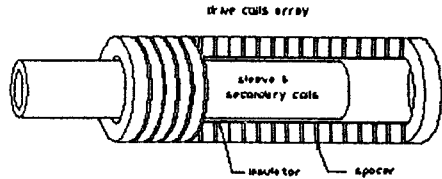


그림 2-1. Sleeve 가 움직이는 경우에서의 선형 모타  
Fig. 2-1. Tubular type linear motor in case of moving sleeve

1. 서론

원형코일을 사용하는 진자기 응용기기는 예로부터 널리 사용되고 있다. 자장을 발생시키기 위한 장치와 전동력을 얻기 위한 장치로 대별되는데, 이중 전동력을 얻기 위한 장치에는 1차코일과 2차코일을 갖는 구조가 대부분이다. 이들은 선형모타(TLM)로 명칭되고 있는데, 그 대표적인 응용분야는 actuator, L.L, linear elevator, pipeliner, electropult, magnaplane 등이다.

본 논문에서 해석하고자 하는 충격입력을 얻기 위하여 가정된 전기적 회로에서, 2차축(sleeve) 를 1차축에 환산한 모델은 그림 2-2 와 같다.

1,2차 코일의 전원 공급형태에 따라 작용력의 표현이 달라질것이나, 기본적으로 이들의 가동자는 두가지의 응력을 받고 있다. 그중 한가지는 drive 와 sleeve 의 coils 사이에 작용하는 radial force 에 의한것이며, 다른 하나는 sleeve 내부의 coil 상호간에 작용하는 내부응력에 의한것이다. System 의 구조분은, 기계적으로 외부에서나 내부상호간에 작용하는 응력에 의하여 영구변형(permanent deformation)이 되지 않는 한계의 강도를 가져야 한다. 일반적으로 sleeve 의 움직임이, servo linear motor 나 actuator 등과 같이 일정한가동축(longitudinal axis) 을 따라 진행되는 경우도 있지만, levitation system, launcher 등에서와 같이 sleeve 의 이동이 공간적으로 비교적 자유로운 경우도 있다. 그러나 응력에서의 가장 최악조건은 sleeve 의 가동축이 drive array 의 linear axis (longitudinal axis)와 일치된 경우 이다. 왜냐하면 sleeve 의 longitudinal axis 와 drive array 의 longitudinal axis 가 일치하지않는 경우, 즉 sleeve 가 off-center 된 경우, 양극면의 차이는 복원력으로 작용하여 radial axis 에서의 운동에너지를 일부 흡수 되고 나머지가 stress energy 로 작용하므로 진자의 경우에 비하여 순시 에너지 측면에서 볼때 복원 운동에너지 만큼의 차이가 생기게 된다. 이러한 이유에서 sleeve 의 longitudinal axis 와 drive array 의 longitudinal axis 가 일치한 경우의 응력해석은 대부분의 상황을 만족한다고 볼수 있다.

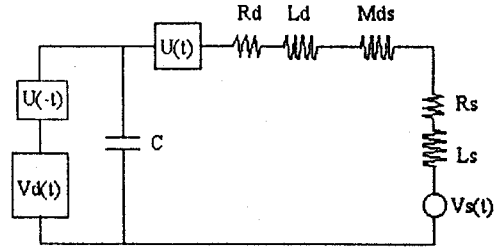


그림 2-2. 전기적 등가회로  
Fig. 2-2. Equivalent electrical circuit

3. CALCULATION

1,2차 코일의 전원 공급형태에 따라 작용력의 표현이 달라질것이나, 기본적으로 이들의 가동자는 두가지의 응력을 받고 있다. 그중 한가지는 drive 와 sleeve 의 coils 사이에 작용하는 radial force 에 의한것이며, 다른 하나는 sleeve 내부의 coil 상호간에 작용하는 내부응력에 의한것

이다.

Sleeve 가 기울어져 있는 경우가 아니라고 가정하면, sleeve coil 의 전류는 cylindrical component 에서 angular (tangential) term 만을 가지게 된다. Sleeve 의 표면의 미소길이에 작용하는 힘 radial force 는 sleeve 의 전류들  $I_{pj}$  drive coil current 에 의한 자속밀도를  $B_p$ , sleeve coil 의 전류에 의해 발생된 자속밀도를  $B_p$  라고 하면 식(3-1)에 표시된 바와 같이 나타내어진다.

$$d\vec{F}_r = I_p d\vec{l} \times (\vec{B}_{zd} + \vec{B}_{zp}) = I_p d\vec{l} \times \vec{B}_{zd} + I_p d\vec{l} \times \vec{B}_{zp} \quad (3-1)$$

윗식에서 제 1 항은 drive 와 sleeve 사이의 작용력이며, 제 2 항은 sleeve coil 상호간에 작용하는 내부힘이다.

### 3-1. Drive coil 과 Sleeve coil 상호간에 작용하는 radial force

Drive coil 의 사이에 놓인 임의의 sleeve coil 에 대하여, drive coil 의 전류에 의하여 생긴 자속은 sleeve coil 의 전류와 쇠고하여 힘을 발생시키고 이에 의하여 sleeve 의 미소 표면 각각에 stress 가 작용하게 된다. 다수(Ndc)의 drive coil array 가운데 위치한 임의(i-th)의 sleeve coil 을 가정하면 각각의 drive coil 전류와 임의(i-th)의 sleeve coil 전류에 의하여 임의(i-th)의 sleeve 표면에 stress 가 작용하게 된다.

식 3-1 에서 표시된 radial axis 힘의 분력 가운데 제 1 항의 성분을 elliptic integration formula 를 이용하여 계산하면 식 3-2 과 같이 표시된다.

$$d\vec{F}_r = -P_m dl \cdot \vec{a}_r \quad (N) \quad (3-2)$$

$P_m$  은 magnitude radial force 로써 식 3-3 와 같다.

$$P_m = I_p \left\{ \sum_{j=1}^{N_{dc}} \frac{\mu_0 I_{pj} T_{pj} T_{pj}}{2\pi [(R_1 + R_2)^2 + Z_{dy}^2]^{3/2}} \left[ \frac{R_1^2 - R_2^2 - Z_{dy}^2}{(R_1 - R_2)^2 + Z_{dy}^2} \cdot E_y + K_y \right] \right\} \quad (3-3)$$

$$E_y = \int_0^{\pi/2} (1 - \kappa_y^2 \sin^2 \theta)^{1/2} d\theta \quad (3-4)$$

$$K_y = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{(1 - \kappa_y^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} d\theta \quad (3-5)$$

$$\kappa_y^2 = \frac{4R_d R_p}{(R_d + R_p)^2 + Z_{dy}^2} \quad (3-6)$$

$$Z_{dy} = L_d(j-1) - L_p(i-1) \quad (3-7)$$

$T_{dj}$  = turns in the i-th drive coil

$T_{pj}$  = turns in the j-th sleeve coil

$I_{dj}$  = current in the i-th drive coil

$I_{pj}$  = current in the j-th sleeve coil

이다[3].

### 3-2. Sleeve coil 내부에서 작용하는 radial force

식 3-1 에서 표시된 radial axis 힘의 분력 가운데 제 2 항의 성분은 식 3-8 과 같이 표시된다.

$$d\vec{F}_r = -P_m dl \cdot \vec{a}_r \quad (N) \quad (3-8)$$

이 경우에서의 magnitude radial force,  $P_m$ , 은

$$P_m = I_p \sum_{j=1}^{N_{dc}} \frac{\mu_0 I_{pj} T_{pj} T_{pj}}{2\pi \sqrt{4R_p^2 + Z_{py}^2}} [-E_{ij} + K_{ij}] \quad (3-9)$$

$$\text{여기서 } \kappa_y^2 = \frac{4R_p^2}{4R_p^2 + Z_{py}^2} \quad (3-10)$$

$$Z_{py} = L_p(j-i) \quad (3-11)$$

이다.

## 4. STRESS

### 4-1. Radial Stress

한개의 sleeve element 에 대한 임의의 drive coil 을 그림 4-1 과 같이 가정한다. 임의의 drive coil 에서의 권선수와 전류를 각각  $T_{di}, I_{di}$  라 하고, sleeve element 에서의 권선수와 전류를 각각  $T_{si}, I_{si}$  이라 한다.

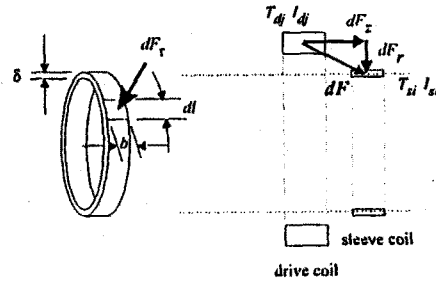


그림 4-1. Radial stress  
Fig. 4-1. Radial stress

선장된 sleeve element 에서의 미소 길이를  $dl$  이라 하고 sleeve element 의 폭을  $b$  라 하면 해석대상인 미소표면의 면적은  $dS = b dl$  ( $m^2$ ) 이다. 식 3-2 에서 구한 radial force 와 미소 표면적으로 부터 식 4-1 과 같은 radial stress 식을 얻는다[2].

$$\sigma = \frac{dF_r}{dS} = \frac{P_m dl}{b dl} = \frac{P_m}{b} \quad (N/m^2) \quad (4-1)$$

식 4-1 에서의  $P_m$  은 식 3-3, 3-9 에서와 동일하다. Sleeve coil 과 drive coil 의 longitudinal axis 가 같은 경우를 가정 하였으므로 식 4-1 에서 구한 radial stress 는 sleeve element 의 각부분에 대하여 일정하다.

### 4-2. Tangential Stress

제질에서의 stress 표현은 tangential tension stress 를

기준으로 하는 경우가 많다. 따라서 식 4-1 에서 구한 radial stress 를 tangential stress 로 환산할 필요가 있다. 이를 위하여 radial stress 에서부터 tangential stress 를 구하는 식을 구한다. tangential stress 는 식 4-2 과 같이

$$\sigma_t = \frac{dF}{dS} = \frac{r}{A} P_m = \frac{r}{b \cdot \delta} P_m \quad (N/m^2) \quad (4-2)$$

Magnitude radial force,  $P_m = b \cdot \sigma_r$  이므로, 식 (4-1) 과 (4-2) 으로부터 식 (4-3)와 같은 관계식을 유도한다.

$$\sigma_t = \frac{r}{\delta} \sigma_r \quad (4-3)$$

한편, 식(4-3)에서의 관계식을 식(4-4)와 같은 실험식과 비교하여 확인한다[1].

$$\sigma_r = k \frac{2\sigma_t \cdot \delta}{D - 0.8 \cdot \delta} \quad (4-4)$$

여기서  $\sigma_r$  는 radial (circumferential) tensile stress,  $\sigma_t$  는 tangential (longitudinal) tensile stress, D 는 diameter of the sleeve (inch), k 는 상수로써 1과 가까운 값을 가진다 ( $k = 0.85$  for 3003-O).  $D = 2r$  이며 sleeve element 의 두께,  $\delta$ , 는 직경에 비하여 매우 작고 상수 k 는 1 과 가까운 값이므로, 식(4-3)와 (4-4)에 의해 계산된 값은 거의 같은 결과를 갖 입을 알 수 있다.

식 3-2 과 3-8 의 결과를 식 4-1에 대입하여 radial stress 를 나타내는 식 4-5 을 얻는다.

$$S_r = \frac{2 \times 10^{-7} I_{pl}}{6895 L_p} \left\{ \sum_{j=1}^{N_{dc}} \frac{I_{dj} T_{dj}}{[(R_1 + R_2)^2 + Z_{dj}^2]^{3/2}} \right. \\ \left. \frac{R_1^2 - R_2^2 - Z_{dj}^2}{(R_1 - R_2)^2 + Z_{dj}^2} \cdot E_U + K_U \right\} + \\ \sum_{j=1}^{N_{pc}} \frac{I_{pj}}{\sqrt{4R_p^2 + Z_{pj}^2}} [-E_U + K_U] \quad (psi) \quad (4-5)$$

또한, 식 (4-4)를 이용하면 식(4-5)으로부터 tangential tension stress 식을 구할 수 있다.

## 5. SIMULATIONS

Simulation 을 위하여 표 1 에서와 같은 규격의 Tubular coil type linear motor 를 사용하였다. System 구성은 그림 2-3 에서와 같이 하였다. 입력조건은 표 2 와 같다.

표 1. Tubular coil type linear motor 규격

| drive coils array |          |          |                  |
|-------------------|----------|----------|------------------|
| 직경<br>cm          | 폭<br>cm  | 권선수      | coil no<br>(Ndc) |
| 7.94              | 3.02     | 10       | 6                |
| sleeve            |          |          |                  |
| 직경<br>cm          | 두께<br>mm | 길이<br>cm | Al.<br>계질        |
| 4.92              | 1.65     | 20.0     | 2024T3           |

표 2. 입력조건

| V(KV) | C (μF)   | L(mH) | τ(cm) | 초기속도 |
|-------|----------|-------|-------|------|
| 3.9   | 3 × 1200 | 0.015 | 10.0  | 0.0  |

그림 5-1 은 sleeve 를 drive coils array 에 넣고 구동시켜 시간적 변화에 대한, sleeve 각부분에서의 stress 변화를 3차원적으로 그린 것이다. 그림 5-2 는 그림 5-1에 나타난 각 시간별로 최대표면응력과 그것이 발생한 sleeve 에서의 위치를 그린 것이다.

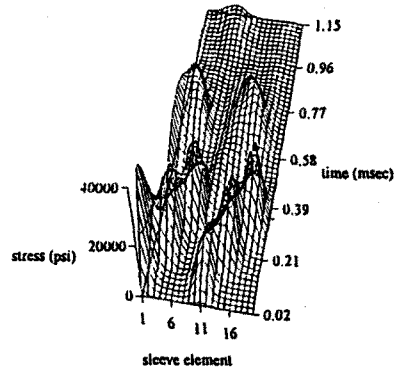


Fig. 5-1. Stress map as a function of elapsed time

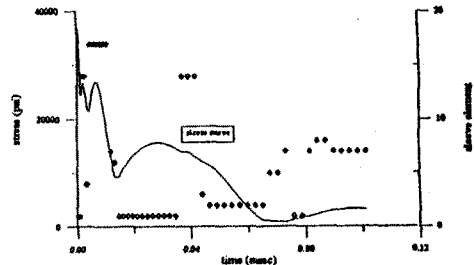


Fig. 5-2. Location and Magnitude of maximum stress as a function of elapsed time

이러한 방법으로, sleeve 에서의 시간적 변화나 조건에 따른 여러가지 표면응력 현상을 알아 볼 수 있다.

## REFERENCES

- 1955 Pressure Piping Code ASA-B31.1
- J.E. Shigley, C.R. Mischke "Mechanical Engineering Design, 5th Ed." McGrawHill 1989
- Ki-Bong Kim, Z.Zabar, E.Levi, and L.Birenbaum "In-bore projectile dynamics in the linear induction launcher. part 1, Oscillations", IEEE Trans. on Magnetics, Jan. 1995, Vol. 31, No.1, pp. 484-488