

댐핑 와이어를 갖는 새도우 마스크의 해석모델에 대한 실험적 검증

Experimental Verification of Analysis Model of the Shadow Mask with Damping Wires

김성대* · 김원진** · 이종원***
Sung-Dae Kim, Won-Jin Kim and Chong-Won Lee

Key Words : tension distribution(장력 분포), shadow mask(새도우 마스크), damping wire(댐핑 와이어), nonlinear vibration analysis(비선형 진동해석), contact(접촉), impact(충돌),

ABSTRACT

The nonlinear vibration of the CRT shadow mask is analyzed in consideration of the V-shaped tension distribution and the effect of wire impact damping. The reduced order FEM model of the shadow mask is obtained from dynamic condensation for the mass and stiffness matrices. Damping wire is modeled using the lumped parameter method to effectively describe its contact interactions with the shadow mask. The nonlinear contact-impact model is composed of spring and damper elements, of which parameters are determined from the Hertzian contact theory and the restitution coefficient, respectively. The analysis model of the shadow mask with damping wires is experimentally verified through impact tests of shadow masks performed in a vacuum chamber. Using the validated analysis model of the shadow mask with damping wires, the 'design of experiments' technique is applied to search for the optimal damping wire configuration so that the vibration attenuation of the shadow mask is maximized.

1. 서론

모니터나 TV용으로 사용되는 음극선관 내부에 있는 새도우 마스크는 전자총에서 발사된 RGB(red, green and blue)의 전자빔을 각각 원하는 RGB 형광체에 정확하게 도달할 수 있도록 하는 중요한 역할을 한다. 하지만 외부의 충격으로 인해 새도우 마스크가 과도한 진동을 하게 되면 이러한 기능을 제대로 수행하지 못하여 화면에 얼룩무늬가 발생하게 되는데 이를 마이크로포닉(microphonic) 현상이라고 하며 음극선관의 중요 품질이다. 대형 TV에서는 마스크의 자체 강도를 위해 장력형 새도우 마스크를 주로 사용하며, 일본 특허[1]와 같이 진동저감을 위해 V-형 장력분포를 갖게 한 마스크를 주로 사용한다. 그러나 음극선관 내부는 진공이고 음극선관 자체가 진동에 매우 민감한 제품이므로 댐핑 와이어라고 불리는 수십 μm 의 아주 가는

와이어를 새도우 마스크 위에 결합시켜 감쇠력을 증가시키는 방법을 사용한다.

댐핑 와이어에 대한 실험자료나 특허는 많지만 구체적인 해석사례는 거의 없으며, Ohmura는 댐핑 와이어를 임피던스로 가정하여 해석할 수 있다는 방향만을 제안하였고 [2], 근접한 연구로는 Shin의 연구가 있다. 그는 상용 유한요소해석 코드를 이용하여 장력분포가 일정한 평면 새도우 마스크에 대해 와이어와의 접촉을 고려한 비선형 진동해석을 시도하였다 [3]. 하지만 충돌특성을 적절히 고려하지 못하여 실험 결과와 일치하지 않으며 시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

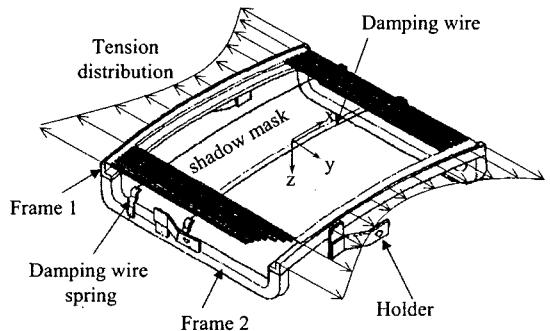


Fig. 1 Tension shadow mask with damping wires

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과 대학원
E-mail : sungdae@mail.kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3056

** 정희원, 계명대학교 기계.자동차공학부

*** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 x축을 따라 V-형 장력 분포를 가지며 완만한 곡률을 갖는 새도우 마스크에 장력이 있는 댐핑 와이어가 결합된 시스템에 대해 접촉을 고려한 비선형 진동해석 모델을 만들고 신뢰성을 실험적으로 검증하고자 한다. 그리고 해석모델과 다구찌방법을 이용하여 와이어의 최적 설계안을 도출하려고 한다. 해석모델에 대해서는 참고문헌[4]에 상세히 기술되어 있다.

2. 새도우 마스크 모델링

이방성 연속체로 상사한 새도우 마스크에 대해 먼저 상용 유한요소 해석코드를 이용하여 장력에 의한 응력해석을 수행하고 다시 이를 초기응력으로 부가한 진동모드해석을 수행하였다.

Fig. 2는 측정과 유한요소 해석으로 구한 모드형상을 비교한 것이다. V-형의 장력분포로 인해 모드형상이 국부적이며 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

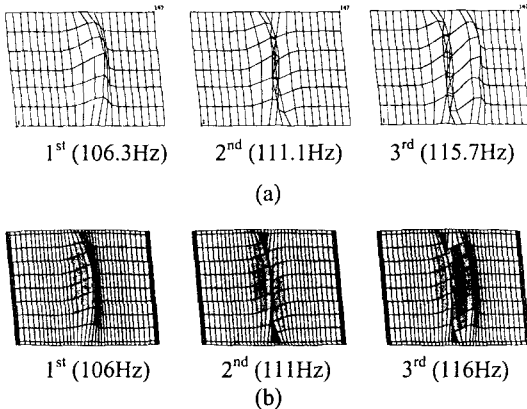


Fig. 2 Comparison of the mode shapes obtained from (a) experiments and (b) FE analysis

그리고 댐핑 와이어와의 충돌을 고려한 비선형 진동해석을 효율적으로 수행하기 위하여 동적 축약을 이용하여 자유도를 줄이고자 한다 [5].

전체 유한요소모델로부터 구한 장력 마스크의 운동 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있으며

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_0 \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{M}_0 와 \mathbf{K}_0 는 질량 및 강성행렬이며, \mathbf{u} 는 변위 벡터이다. \mathbf{u} 는 유한요소모델 절점수의 6배에 해당하는 자유도를 가진다. 마스크의 주 진동방향은 z방향이므로 \mathbf{u} 의 z방향 성분을 주 자유도 (\mathbf{u}_m)로 설정하고 나머지를 모두 부

자유도 (\mathbf{u}_s)로 간주하면 식(1)은 다음과 같은 분할행렬 형태로 만들 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{M}_{ms} \\ \mathbf{M}_{sm} & \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_m \\ \ddot{\mathbf{u}}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{sm} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_m \\ \mathbf{u}_s \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2)$$

식(2)의 둘째행에서 주 자유도와 부 자유도간의 관계에 있어 관성력의 영향이 작은 것을 이용하면 자유도가 \mathbf{u}_m 으로 축소된 새도우 마스크의 운동 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{u}}_m + \mathbf{K}_m \mathbf{u}_m = \mathbf{0} \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_m &= \mathbf{M}_{mm} - \mathbf{M}_{ms} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} - \mathbf{K}_{ms} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{M}_{sm} \\ &+ \mathbf{K}_{ms} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{M}_{ss} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_m = \mathbf{K}_{mm} - \mathbf{K}_{ms} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm}$$

실제 마스크에 있어 z방향의 진동이 우세하기 때문에 Table 1에서 보여주듯이 동적축약 전후의 고유진동수가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

마스크에 대한 감쇠와 가해지는 힘을 고려하면 식(3)의 운동방정식은 아래와 같이 쓸 수 있으며

$$\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{u}}_m + \mathbf{C}_m \dot{\mathbf{u}}_m + \mathbf{K}_m \mathbf{u}_m = \mathbf{F}_m \quad (5)$$

여기서 \mathbf{C}_m 은 댐핑계수 행렬이며 힘은 비선형 접촉력과 외력으로 구성되며 $\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_C + \mathbf{F}_E$ 이다. 댐핑 계수는 진공상태의 새도우 마스크가 갖는 수준의 감쇠율을 고려하여 $\mathbf{C}_m = \beta \mathbf{K}_m$ 로 가정하고 β 를 결정하였다.

Table 1 Comparison of natural frequencies for two models

Mode	1 st	2 nd	3 rd	20 th
Full Model	106.3	111.1	115.7	180.3
Condensed model	106.5	111.6	116.5	189.2

3. 댐핑 와이어의 모델링

댐핑 와이어는 마스크와의 충돌현상을 쉽게 기술하기 위하여 집중질량방법으로 모델링 하였다. 먼저 각 요소의 질량은 다음과 같이 요소 길이에 해당하는 집중질량으로 구할 수 있다.

$$m_i = \rho \cdot \frac{(\Delta s_{i-1} + \Delta s_i)}{2} \quad (6)$$

여기서 Δs_i 는 i번째 요소의 길이이며 ρ 는 단위

길이당 질량이다.

그리고 마스크와의 결합력 $f(x)$ 는 조립후의 와이어의 형상을 이용하면 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f(x) = -T \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} \quad (7)$$

여기서 T 는 와이어의 장력이며 $u(x)$ 는 x 위치에서의 z 방향의 변위이다. 식(7)을 이용하여 힘과 변위의 관계를 표현하면, 와이어 집중요소에 대한 강성계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_i = \frac{T(x)}{\Delta x} \Big|_i = \frac{T}{\Delta x_i} \quad (8)$$

여기서 Δx_i 는 i 번째 요소 길이의 x 축 성분이다.

단위 길이당 질량 $1.35 \times 10^{-5} \text{kg/m}$ 과 장력 130gf 인 와이어를 기준으로 계산된 와이어의 첫번째 고유진동수는 248Hz 이며 정해와의 오차가 0.5% 내로 일치함을 확인할 수 있었다.

4. 비선형 충돌 모델

V-형 장력분포를 갖는 새도우 마스크와 뎀핑 와이어에 대하여 마스크의 특정 공진모드에서의 운동을 고속카메라로 촬영하고, 마찰력이 발생될 수 있는 x, y 방향의 상대변위를 측정하였다. 결과는 모두 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 로 측정되었으며 z 방향의 변위($100\mu\text{m}$ 내외)나 와이어의 직경($30\mu\text{m}$)과 비교해 볼 때 매우 작은 양이므로 마찰보다는 z 방향의 충돌이 지배적인 것으로 판단되었다. 이는 V-형 장력분포로 인해 마스크의 모드는 국부적으로 발생하고 와이어는 공진상태가 아니므로 충돌이 주로 발생하는 것으로 판단된다. 이를 토대로 접촉 현상을 기술하기 위해 스프링과 감쇠기를 갖는 충돌요소를 도입하였으며 각각의 계수는 Hertz 접촉이론과 반발계수를 이용하여 다음과 같이 구하였다.

4.1. 충돌 강성계수

충돌 강성계수는 두 실린더에 대한 Hertz 접촉이론을 적용하여 추출하였다. 길이가 L 이고, 직경이 각각 D_1 과 D_2 인 두 실린더가 힘 P 로 접촉하고 있을 때 표면의 자국에 대한 폭 b 는 Hertz 접촉이론을 사용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b = 1.60 \sqrt{pK_D C_E} \quad (9)$$

여기서 $p = P/L$, $C_E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ 그리고

$K_D = \frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2}$ 이며, 아래 첨자 1, 2는 각각

실린더1(마스크), 실린더2(와이어)를 나타내며 E_i 와 ν_i 는 영계수와 프와송비이다. 마스크의 곡률의 직경은 와이어에 비해 매우 크므로 $D_1 \gg D_2$ 이며, $E_1 = E_2$ 과 $\nu_1 = \nu_2$ 인 조건을 적용하면 접촉력 방향으로의 압축량(Δu)은 다음과 같이 구해진다 [6,7].

$$\Delta u = \frac{2p(1-\nu^2)}{\pi E} \left(\frac{1}{3} + \ln \frac{2D_2}{b} \right) \quad (10)$$

그러므로 주어진 압축력 수준에서의 접촉 강성은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_c = \frac{dp}{du} \quad (11)$$

이를 이용하여 와이어의 장력 130gf 인 조건에서 구한 접촉강성(K_c)은 $2.12 \times 10^8 \text{ N/m}$ 이다. 하지만 이 값은 반무한 강체에서의 표면 자국(indentation)에 의한 강성을 가정한 것이므로 마스크와 같이 유연한 판에 대한 충돌강성보다는 매우 크게 평가되었을 것으로 판단할 수 있다 [7].

4.2. 충돌 감쇠계수

와이어의 질량이 마스크에 비해 매우 작으므로 마스크를 스프링-댐퍼 지지대로, 와이어 요소는 충돌 질량으로 간주할 수 있다. 이때 와이어 요소의 충돌 전후의 속도비를 이용하면 충돌 감쇠계수를 구할 수 있다.

반발 계수(r)의 정의에 따라

$$r = -\frac{\dot{u}(t_{out})}{\dot{u}(t_{in})} = \frac{\left| \dot{u} \left(\frac{1}{2} \tau \right) \right|}{|\dot{u}(0)|} = e^{-\omega_n \left(\frac{1}{2} \right)} \quad (12)$$

로 쓸 수 있으며, 여기서 $\dot{u}(t_{in})$ 와 $\dot{u}(t_{out})$ 는 충돌 전후의 속도이며, ω_n 은 접촉시의 고유 진동수 그리고 τ 는 그때의 주기이다. 또한 $\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \cdot \tau = 2\pi$ 의 관계를 이용하면 등가 충돌 감쇠율은 다음과 같이 r 의 함수로 구할 수 있다.

$$\zeta_r = \sqrt{\frac{(\ln r)^2}{\pi^2 + (\ln r)^2}} \quad (13)$$

그러므로 충돌 감쇠계수는 다음과 같이 표현될 수 있으며

$$C_c = 2\zeta_r \sqrt{K_c M_{dw}} \quad (14)$$

여기서 M_{dw} 는 와이어 요소의 평균질량 ($1.85 \times 10^{-7} \text{kg}$)이며, 반발계수 $r=0.8$ (steel ball)를 기준[8]으로 하면 C_c 는 $0.887 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 가 된다.

도출된 충돌 강성계수와 충돌 감쇠계수에 대해 응답계산에 있어 정확성과 계산시간에 대한 평가를 하였다. 충돌 강성계수는 $2.12 \times 10^5 \text{ N/m}$ 이상의 강성을 유지하기만 하면 해는 일정한 값으로 수렴하였지만 계산시간은 많은 차이를 보였다. $2.12 \times 10^8 \text{ N/m}$ 의 충돌 강성계수를 사용할 경우(1초의 해석결과를 구하는 데 최신 슈퍼컴퓨터를 사용하여 약 18시간 소요) $2.12 \times 10^5 \text{ N/m}$ 를 사용할 때 보다 계산시간이 25배 이상 더 소요되었다. 그러므로 해의 정확성과 계산시간을 고려하여 $2.12 \times 10^5 \text{ N/m}$ 를 해석에 사용하기로 결정하였다. 반면에 충돌 감쇠계수는 충돌 강성계수와는 달리 해의 수렴성과 계산시간에 큰 영향을 미치지 않았으므로 이론적으로 구한 충돌 감쇠계수 $0.887 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 를 그대로 사용하였다.

5. 비선형 진동해석

먼저 자유도가 n 인 마스크에 대한 변위벡터와 전체 자유도가 l 인 와이어들에 대한 변위벡터를 표기하면 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{u}_m = \{u_{m1} \ u_{m2} \ \dots \ u_{mi} \ \dots \ u_{mq} \ u_{m(q+1)} \ u_{m(q+2)} \ \dots \ u_{mj} \ \dots \ u_{mn}\}^T \quad (15)$$

$$\mathbf{u}_d = \{u_{d1} \ u_{d2} \ \dots \ u_{di} \ \dots \ u_{dq} \ u_{d(q+1)} \ u_{d(q+2)} \ \dots \ u_{dj} \ \dots \ u_{dl}\}^T \quad (16)$$

여기서 아래 첨자 m 과 d 는 각각 마스크와 와이어를 의미하며 q 는 전체 접촉 자유도이다.

초기변위는 장력마스크와 와이어들의 조립에 의한 초기 결합력에 의해 발생하는 정적변위를 의미하며 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{u}_m|_{t=0} = \{\delta_{m1} \ \dots \ \delta_{mi} \ \dots \ \delta_{mn}\}^T \quad (17)$$

$$\mathbf{u}_d|_{t=0} = \{\delta_{d1} \ \dots \ \delta_{di} \ \dots \ \delta_{dl}\}^T \quad (18)$$

그리고 초기 결합력(F_{0i})으로 인한 i 번째 충돌 요소의 초기 압축량(δ_{ci})은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\delta_{ci} = F_{0i} / K_{ci}, \quad i=1,2,\dots,q \quad (19)$$

이를 이용하면 장력마스크와 와이어가 결합된

운동 방정식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{u}}_m + \mathbf{C}_m \dot{\mathbf{u}}_m + \mathbf{K}_m \mathbf{u}_m = \mathbf{F}_m \quad (20)$$

$$\mathbf{M}_d \ddot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{C}_d \dot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{K}_d \mathbf{u}_d = \mathbf{F}_d \quad (21)$$

여기서 \mathbf{F}_m 는 마스크에 가해지는 힘이며 접촉점에서의 비선형 접촉력(\mathbf{F}_C)과 외력(\mathbf{F}_E)의 합으로 아래와 같이 구성된다.

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_C + \mathbf{F}_E = \{F_{C1} \ F_{C2} \ \dots \ F_{Ci} \ \dots \ F_{Cq} \ 0 \ 0 \ \dots \ 0\}_n^T + \mathbf{F}_E \quad (22)$$

여기서 F_{Ci} 는 장력마스크상의 i 번째 접촉점에 작용하는 접촉력이며 다음과 같이 조건부로 주어진다.

$$F_{Ci} = \begin{cases} K_{ci}[(u_{di} - \delta_{di}) - (u_{mi} - \delta_{mi}) + \delta_{ci}] + C_{ci}(\dot{u}_{di} - \dot{u}_{mi}) & \text{for } u_{di} - u_{mi} \geq \delta_{di} - \delta_{mi} - \delta_{ci} \text{ (contact)} \\ 0 & \text{otherwise (non-contact)} \end{cases} \quad (23)$$

와이어에 작용하는 힘 \mathbf{F}_d 는 \mathbf{F}_C 의 0이 아닌 반력으로만 구성되며 아래와 같다.

$$\mathbf{F}_d = \{-F_{C1} \ -F_{C2} \ \dots \ -F_{Ci} \ \dots \ -F_{Cq} \ 0 \ 0 \ \dots \ 0\}_l^T \quad (24)$$

Fig. 3은 와이어 및 비선형 충돌요소를 포함하는 장력마스크 시스템에 대한 해석모델의 개념도이다.

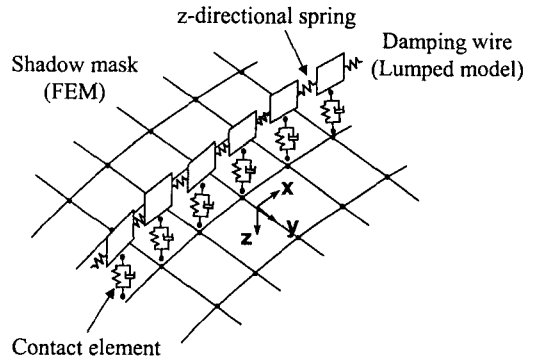


Fig. 3 Analysis model of the shadow mask and damping wire

6. 해석모델의 실험적 검증

충격에 의한 새도우 마스크의 진동지속시간은 공기중에서는 1초 내외로 매우 짧지만 진공인 음극선관 내부에서는 수분씩 잔존한다. 이를 고려하기 위하여 Fig. 4와 같이 진공챔버를 제작하고 새도우 마스크 시스템을 챔버 내에 설치하여 실험을 원격으로 진행하였다. 진공챔버

내부에 진자형태의 충격해머를 실로 고정하고 이를 외부에서 열을 가하여 절단함으로써 가진할 수 있도록 장치하였다.

Vacuum chamber ($\approx 10^{-7}$ torr)
(1200 X 900 X 400 mm³)

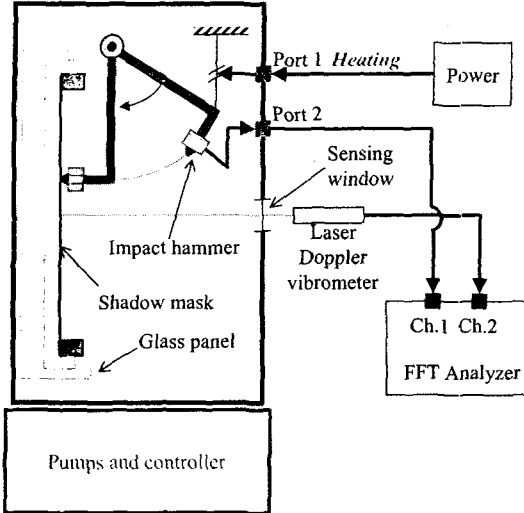


Fig. 4 실험 장치

진공챔버의 센서창을 통하여 외부에서 레이저 속도계로 마스크의 응답을 측정하게 하였으며 2차 모드가 잘 가진될 수 있도록 마스크의 정 중앙이 아닌 $(x, y)=(15.0, 57.5)$ 지점을 가진하고, $(15.0, 0)$ 지점의 응답을 측정하였다.

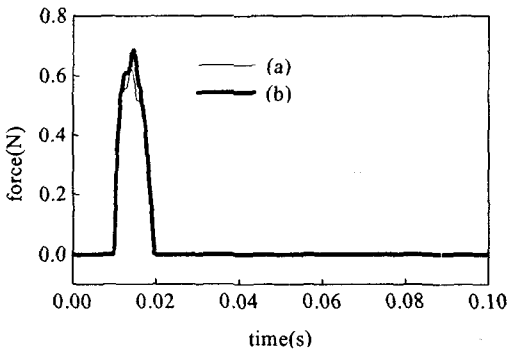


Fig. 5 Measured impact forces used to get responses of the shadow mask (a) w/o wires and (b) w/ 3 wires

Fig. 5는 댐핑 와이어가 없는 경우와 130gf의 장력을 가진 댐핑 와이어가 3개 설치된 경우에 사용된 충격력의 측정치이며 이들을 각각 입력으로 하여 실험과 해석에서 구한 응답을 Fig. 6 ~ Fig. 8에서 비교하였다. 먼저 Fig. 6에서 보면 마스크의 선형모델이 실제 마스크의 동특성을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

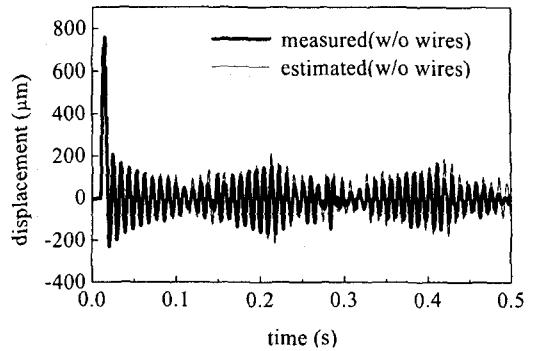


Fig. 6 Comparison of the measured and estimated time histories of the shadow mask without wires

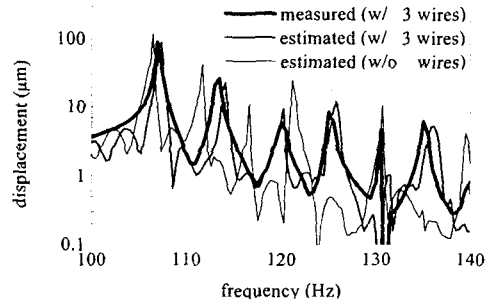


Fig. 7 Comparison between the measured and estimated response spectra

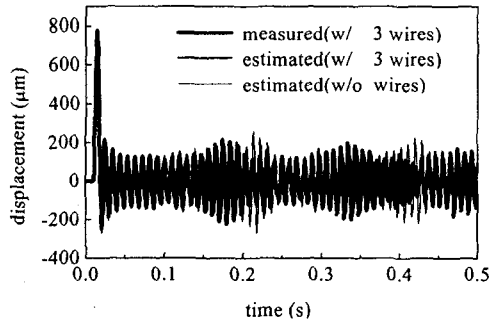


Fig. 8 Comparison between the measured and estimated time histories

Fig. 7은 와이어가 3개 설치된 경우에 대한 응답의 스펙트럼이며 와이어로 인해 마스크의 고유진동수가 높아지는 실제 현상을 비선형 해석모델이 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 이때의 시간응답을 와이어가 없는 경우와 함께 비교한 것이다. 실험과 해석결과가 잘 일치하고 있으며 댐핑 와이어가 없는 경우와는 차별됨을 확인할 수 있다. 그러므로 댐핑 와이어를 갖는 새도우 마스크에 대한 비선형

해석모델이 동특성을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

7. 와이어 설계변수의 영향도 평가

댐핑 와이어의 주요 설계변수들은 와이어의 개수 및 장력(고유진동수), 와이어들간의 간격, 고정점 위치이며 이들에 대해 다구찌 방법[9]을 이용하여 영향도를 해석적으로 평가하였다.

주요 설계변수는 댐핑 와이어의 개수와 장력으로 파악되었으며, 와이어들간의 간격이나 고정점에 대한 약간의 변동은 영향이 크지 않았다. 특이한 점은 마스크 진동에 대한 저감성능이 와이어의 고유진동수 크기에 거의 비례하는 것을 확인하였다. 반면에 장력분포가 일정한 평면 새도우 마스크에서는 두 고유진동수가 같을 경우에 진동저감 성능이 가장 나빠지는 특성을 갖는 것으로 알려져 있다 [3,10]. 본 연구에서의 장력구배가 있고 곡면인 새도우 마스크의 경우는 접촉으로 인해 와이어의 경계조건이 달라져 공진현상이 일어나지 않는 것으로 생각된다.

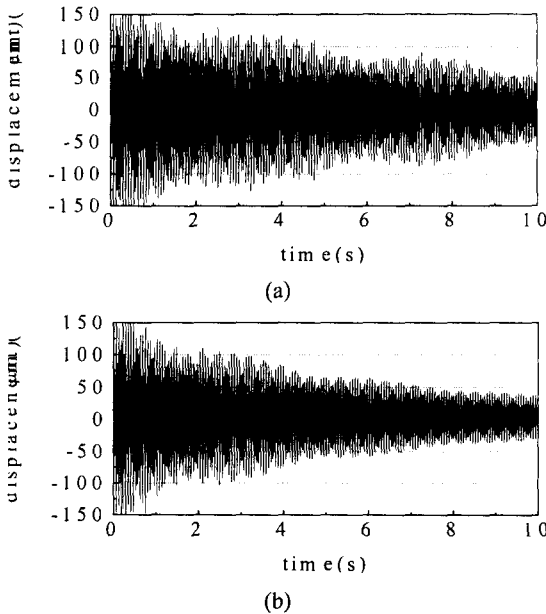


Fig. 9 Time responses (a) without damping wires and (b) with the optimally tuned damping wires

Fig. 9는 여기서 구한 최적의 와이어를 갖는 경우와 댐핑 와이어가 없는 경우에 대한 마스크 중앙점에서의 응답을 비교한 것이다. 10초 후의 진동잔량을 와이어 없는 마스크의 경우와 비교하면 30 ~ 50% 감소되었으며 장력이 크게 걸리는 새도우 마스크의 가장자리 부분일수록

진동저감 효과가 큰 것으로 나타났다.

8. 결론

먼저 V-형 장력분포를 갖는 새도우 마스크에 대해 상용 유한요소해석 코드를 이용하여 모델링하고 질량 및 강성행렬에 대한 동적 축약을 통하여 자유도가 축소된 해석모델을 구성하였고, 마스크와의 충돌현상을 쉽게 묘사할 수 있도록 와이어는 집중질량 방법을 이용하여 모델링하였다. 그리고 와이어와 마스크 간의 비선형 접촉현상은 Hertz접촉 이론과 반발계수를 근거로 한 스프링과 감쇠기를 갖는 비선형 충돌요소를 도입함으로써 댐핑 와이어를 갖는 새도우 마스크 시스템에 대한 비선형 해석모델을 완성할 수 있었다. 음극선관의 내부와 동일한 조건의 진공 챔버를 제작하고 시스템을 내부에 장착하여 원격으로 실험하였으며 충격력에 대한 응답스펙트럼과 시간응답을 비교함으로써 해석모델의 신뢰성을 검증할 수 있었다. 그리고 다구찌방법을 이용하여 댐핑 와이어의 개수와 장력이 주 설계변수임을 파악하였으며 와이어의 고정점에 대한 약간의 변화는 크게 영향을 미치지 않음도 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Shadow mask for CRT, *Japanese Patent* 10-308182.
- (2) Y. Ohmura, M. Hashimoto and H. Taguchi, Effect of damping wire on aperture grill vibration, *IDW '99*, pp.481-484.
- (3) S. J. You, W. S. Shin and B. W. Jang, An analysis of a mask vibration considering contact with a damping wire, *IEEE transactions on consumer electronics*, 2000, Vol. 46(2) pp.385-389.
- (4) S. D. Kim, W. J. Kim, B. Y. Lee and C. W. Lee, "Nonlinear Vibration analysis of porous thin plate with wire impact damping", *Proceeding of KSNVE Autumn Annual Conference*, 2001, pp341-348
- (5) M. Petyt, Introduction to finite element vibration analysis, Cambridge Universal Press, 1990.
- (6) R. J. Roask and W. C. Young, Formulas for stress and strain, McGRAW-HILL, 1976.
- (7) S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, Theory of elasticity, 3rd ed., McGRAW-HILL, 1982.
- (8) A. Higdon, Engineering Mechanics, Prentice Hall, 1979.
- (9) M. S. Phadke, Quality engineering using robust design, Prentice-Hall, 1989.
- (10) S. D. Kim, Damper wire for shadow mask in flat Braun tube, Application number of *US patent* 09/689,869, 1999.