

# 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

(2002년 7월 11일 접수 : 2002년 8월 21일 심사완료)

**Key Words** : Tension Distribution(장력 분포), Shadow Mask(새도우 마스크), Damping Wire(댐핑 와이어), Nonlinear Vibration Analysis(비선형 진동해석), Contact(접촉), Impact(충돌),

### ABSTRACT

Nonlinear vibration of the CRT shadow mask with impact damping wires is analyzed in consideration of the mask tension distribution and the effect of wire impact damping. A reduced order FEM model of the shadow mask is obtained from dynamic condensation of the mass and stiffness matrices, and 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.

### 1. 서 론

모니터나 TV용으로 사용되는 음극선관 내부에 있는 새도우 마스크는 전자총에서 방사된 RGB(red, green and blue)의 전자빔을 각각 원하는 RGB 형광체에 정확하게 도달할 수 있도록 하는 중요한 역할을 한다. 하지만 외부로부터 진동이나 충격이 유입되어 새도우 마스크에 과도한 진동이 발생되면 이러한 기능을 제대로 수행하지 못하여 화면에 얼룩무늬가 발생하게 되는데 이를 마이크로포닉(microphonic) 현상이라고 한다. 이는 음극선관의 중요 품질이다. 대형 TV에서는 마스크의 자체 강도를 위해 장력형 새도우

마스크를 주로 사용하며, 일본 특허<sup>(1)</sup>와 같이 진동저감을 위해 V-형 장력분포를 갖게 한 마스크를 주로 사용한다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 음극선관 내부는 진공이고 음극선관 자체가 진동에 매우 민감한 제품이므로 댐핑 와이어라고 불리는 수십  $\mu\text{m}$ 의 아주 가는 와이어를 이용하여 새도우 마스크의 감쇠력을 증가시키는 방법을 사용한다.

댐핑 와이어를 갖는 새도우 마스크의 동특성에 관한 연구는 대부분 특허로 공개되고 또한 실험에 의존하고 있다. 또한 몇몇 해석의 경우는 매우 간단한 모델이나 상용 해석코드를 이용하지만 충돌특성을 적절히 고려하지 못하여 실험 결과와 잘 일치하지 않는다.<sup>(1-4)</sup>

본 연구에서는 Fig. 1과 같이  $x$ 축을 따라 V-형 장력 분포를 가지며 완만한 곡률을 갖는 새도우 마스크에 장력이 있는 댐핑 와이어가 결합된 시스템에 대해 접촉현상을 실험적으로 규명하고 이를 고려한 비선형 진동해석 모델을 구성하며 이에 대한 신뢰성을 실험적으로 검증하고자 한다.

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

\* 정회원, 계명대학교 기계·자동차공학부

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

## 2. 새도우 마스크 모델링

Fig. 2는 Fig. 1의 장력형 새도우 마스크를 상용 유한요소해석 코드를 이용하여 해석적으로 구한 모드형상을 실험으로 구한 것과 비교한 것이다. (5) V-형의 장력분포로 인해 모드형상이 국부적이며 고차 모드일수록 변형지점이 바깥으로 밀려 나가는 모습을 볼 수 있으며 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그러나 댄핑 와이어와의 충돌을 고려한 비선형 진동 해석을 효율적으로 수행하기 위해서는 위의 유한요소 모델은 자유도가 너무 많으므로 동적축약을 통하여 자유도를 줄이고자 한다. 새도우 마스크의 진동에 있어 z방향의 성분이 우세하므로 이를 주 자유도로 간주하고 나머지 자유도를 부 자유도로 간주하는 동적축약을 하였으며 이를 통하여 자유도가 1/6로 줄어든 새도우 마스크의 운동방정식을 아래와 같이 도출할

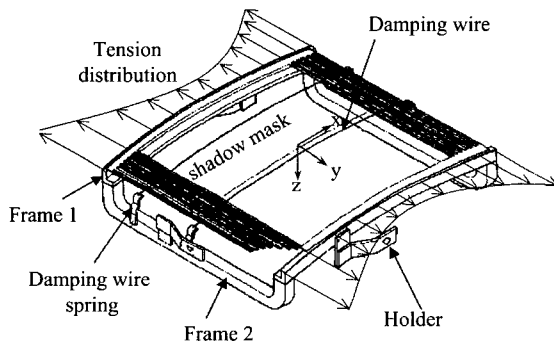


Fig. 1 Tension shadow mask with damping wires

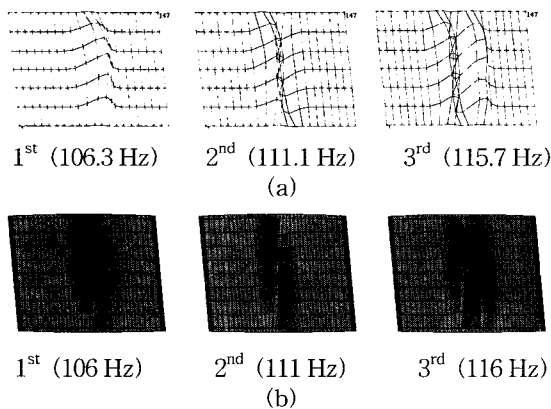


Fig. 2 Comparison of the mode shapes obtained from (a) Experiments and (b) FE analysis

Table 1 Comparison of natural frequencies for two models

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

수 있었다.<sup>(5,6)</sup>

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

여기서  $\mathbf{u}_m$ 은 새도우 마스크의 z방향의 자유도를 의미한다.

Table 1은 동적축약 전후의 고유진동수를 비교한 것이며 1%내외로 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 새도우 마스크에 있어 z방향의 진동이 실제적으로 우세하기 때문이다.

## 3. 댄핑 와이어의 모델링

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

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

여기서  $\Delta s_i$ 는 i번째 요소의 길이이며  $\rho$ 는 단위 길이당 질량이다.

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

$$f(x) = -T \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} \quad (3)$$

여기서  $T$ 는 와이어의 장력이며  $u(x)$ 는 x위치에서의 z방향의 변위이다. 식 (3)을 이용하여 힘과 변위의 관계를 표현하면, 와이어 집중요소에 대한 강성계수는 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$k_i = \frac{T(x)}{\Delta x_i} = \frac{T}{\Delta x} \quad (4)$$

여기서  $\Delta x_i$ 는 i번째 요소 길이의 x축 성분이다 단위 길이당 질량  $1.35 \times 10^{-5}$  kg/m과 장력 130 gf인

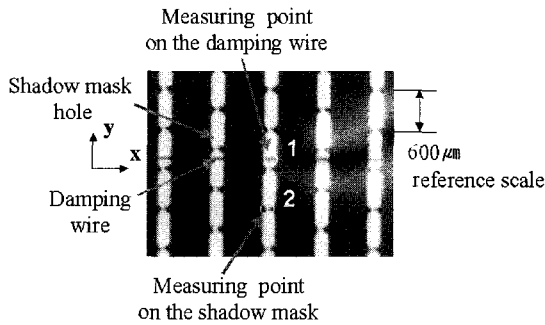


Fig. 3 Relative displacements between the shadow mask and damping wire in the  $x$ ,  $y$  directions captured by a high-speed camera

와이어를 기준으로 계산된 와이어의 첫번째 고유진동수는 248 Hz이며 정해와의 오차가 0.5%내로 일치함을 확인할 수 있었다.<sup>(5)</sup>

#### 4. 비선형 충돌 모델

V-형 장력분포를 갖는 새도우 마스크와 댐핑 와이어에 대하여 마스크의 특정 공진모드에서의 운동을 Fig. 3과 같이 고속카메라로 촬영하고, 마찰력이 발생할 수 있는  $x$ ,  $y$ 방향의 상대변위를 측정하였다. 결과는 모두 3~5  $\mu\text{m}$ 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 판단할 수 있었다. 이는 V-형 장력분포로 인해 마스크의 모드는 국부적으로 발생하고 와이어는 공진상태가 아니므로 충돌이 주로 발생하는 것으로 판단된다. 이를 근거로 접촉 현상을 기술하기 위해 스프링과 감쇠기를 갖는 충돌요소를 도입하였으며 각각의 계수는 Hertz 접촉이론과 반발계수를 이용하여 Fig. 3과 같이 구하였다.

##### 4.1. 충돌 강성계수

충돌 강성계수는 길이가  $L$ 이고, 직경이 각각  $D_1$ 과  $D_2$ 인 두 실린더가 힘  $P$ 로 접촉하고 있는 두 실린더에 대해 Hertz 접촉이론을 적용하여 추출하였다.

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( $\Delta u$ )은 다음과 같이 구해진다.<sup>(7)</sup>

$$\Delta u = \frac{2p(1-\nu^2)}{\pi E} \left( \frac{1}{3} + \ln \frac{2D_2}{b} \right) \quad (5)$$

여기서  $b = P/L$ ,  $b$ 는 접촉에 의한 표면자극의 폭이며, 아래 첨자 1, 2는 각각 실린더1(마스크), 실린더2(와이어)를 나타내고  $E_i$ 와  $\nu_i$ 는 영계수와 프와송비이다. 그러므로 실제 압축력 수준에서의 접촉강성은 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$K_c = \frac{dp}{du} \quad (6)$$

이를 이용하여 와이어의 장력 130 gf인 조건에서 구한 접촉강성 ( $K_c$ )은  $2.12 \times 10^8$  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.<sup>(8)</sup>

##### 4.2. 충돌 감쇠계수

충돌 감쇠계수 ( $C_c$ )는 반발계수의 개념으로부터 구할 수 있다. 와이어의 질량이 마스크에 비해 매우 작으므로 마스크를 스프링-댐퍼 지지대로, 와이어 요소는 충돌 질량으로 모델링할 수 있다. 이와 같은 간단한 충돌 모델에서 와이어 요소의 충돌 전후의 속도비를 이용하면 등가 충돌 감쇠율은 다음과 같이  $r$ 의 함수로 구할 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$\zeta_r = \sqrt{\frac{(\ln r)^2}{\pi^2 + (\ln r)^2}} \quad (7)$$

그러므로 충돌 감쇠계수는 다음과 같이 표현될 수 있으며

$$C_c = 2\zeta_r \sqrt{K_c M_{dw}} \quad (8)$$

여기서  $M_{dw}$ 는 와이어 요소의 평균질량 ( $1.85 \times 10^{-7}$

kg)이며, 반발계수  $r=0.8$ (steel ball)를 기준<sup>(9)</sup>으로 하면  $C_c$ 는  $0.887$  N·s/m가 된다.

도출된 충돌 강성계수와 충돌 감쇠계수에 대해 응답계산에 있어 정확성과 계산시간에 대한 평가를 하였다. 충돌 강성계수는  $2.12 \times 10^5$  N/m 이상의 강성을 유지하기만 하면 해는 일정한 값으로 수렴하였지만 계산시간은 많은 차이를 보였다.  $2.12 \times 10^8$  N/m의 충



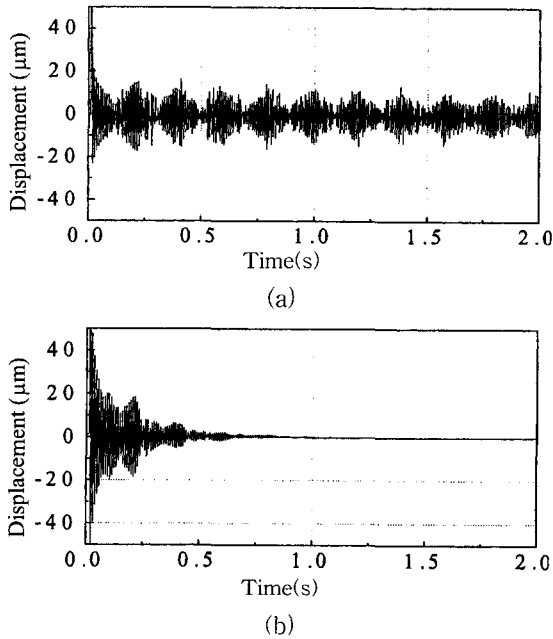


Fig. 5 Comparison of impulse responses of the shadow mask (a) in vacuum and (b) in the air

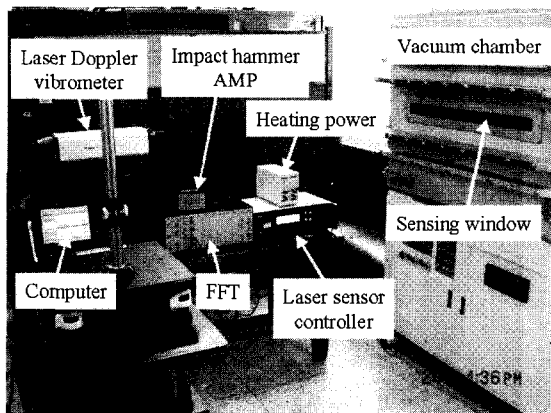


Fig. 6 Experimental set up

Fig. 8에서와 같이 진자형 진동 흡수판을 이용하였다. 실험 수행에 있어서는 진공챔버의 센서창을 통하여 외부에서 레이저 속도계로 마스크의 응답을 측정하게 하였으며 1차 및 2차 모드가 잘 가진될 수 있도록 마스크의 정 중앙이 아닌  $(x, y) = (15.0 \text{ mm}, 57.5 \text{ mm})$  지점을 가진하고,  $(15.0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$  지점의 응답을 측정하였다.

Fig. 9의 곡선 (a) 및 (b)는 각각 댐핑 와이어가 없는 경우와 130 gf의 장력을 가진 댐핑 와이어가 3개

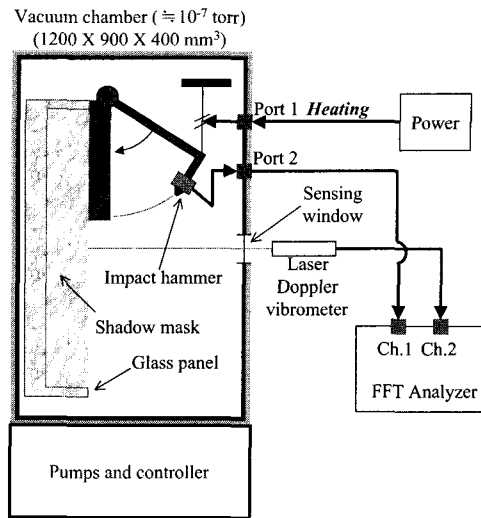


Fig. 7 Schematic figure of the experimental set up

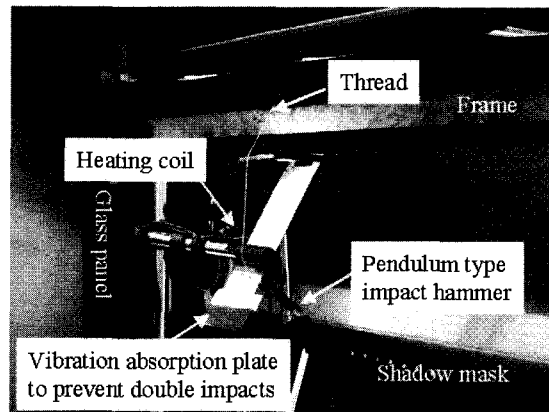


Fig. 8 Detailed picture of the excitation set up

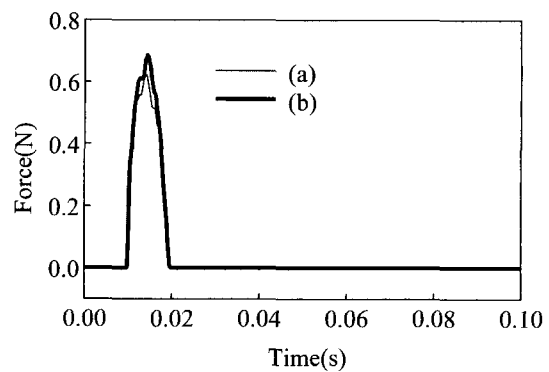


Fig. 9 Measured impact forces used to get responses of the shadow mask (a) w/o wires and (b) w/ 3 wires

설치된 경우의 실험에 대한 충격력의 측정치이며 이들을 입력으로 하여 실험과 해석에서 구한 응답을 Fig. 10~Fig. 12에서 비교하였다. 먼저 Fig. 10은 와이어가 장착되지 않은 마스크에 대한 시간 영역에서의 응답을 실험과 해석결과를 비교한 것이며 서로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 유한요소법을 이용하여 구성된 선형모델이 실제 마스크의 동특성을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

그리고 Fig. 11은 와이어가 3개 설치된 경우에 대한 마스크의 충격응답에 대한 스펙트럼이며 와이어로 인해 마스크의 고유진동수가 높아지는 실제 현상을 비선형 해석모델이 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 12는 이때의 시간응답을 와이어가 없는 경우와 함께 비교한 것으로 실험과 해석결과가 잘 일치하고 있으며 댐핑 와이어가 없는 경우와는 차별됨을 확인할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제시한 댐핑 와이어를 갖는 새도우 마스크에 대한 비선형 해석모델이 실제 시스템의 동특성을 잘 묘사함을 확인할 수 있다.

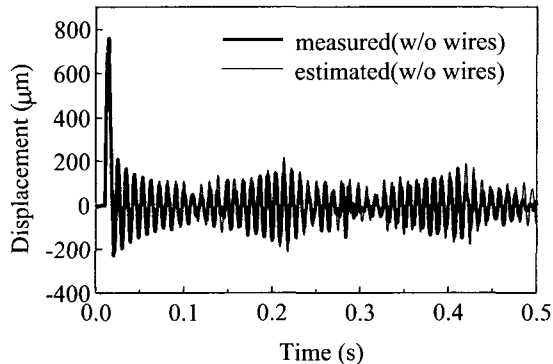


Fig. 10 Comparison of the measured and estimated time histories of the shadow mask without wires

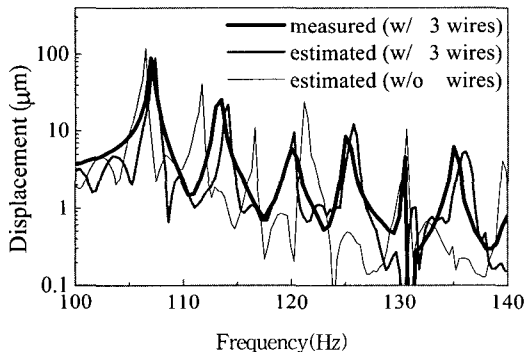


Fig. 11 Comparison between the measured and estimated response spectra

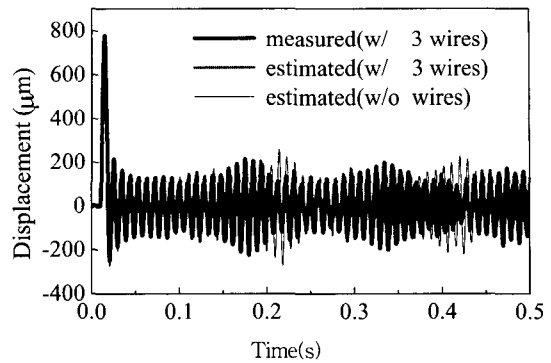


Fig. 12 Comparison between the measured and estimated time histories

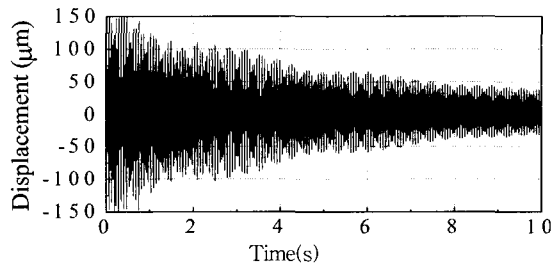
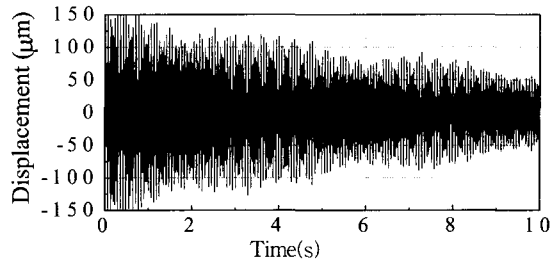


Fig. 13 Time responses (a) without damping wires and (b) with three damping wires

Fig. 13은 와이어를 3개 갖는 경우와 댐핑 와이어가 없는 경우에 대해 마스크 중앙점에서의 진동 응답을 비교한 것이며 와이어가 없는 경우에 비해 10초 후 진동잔량이 약 40% 더 감소함을 알 수 있다.

## 7. 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 Hertz 접촉이론과 반발계수를 근거로 한 스프링과 감쇠기를 갖는 비선형 충돌요소를 도입함으로써 댐핑 와이어를 갖는 새도우 마스크 시스템에 대한 비선형 해석모델을 완성할 수 있었다. 해석 모델에 대한 신뢰성있는 검증을 위해 음극선관의 내부와 동일한 조건의 진공 챔버를 제작하고 마스크 시스템을 내부에 장착하여 원격으로 실험하였으며 충격력에 대한 응답스펙트럼과 시간응답을 비교함으로써 해석모델의 신뢰성을 검증할 수 있었다. 이 해석모델은 현장의 댐핑 와이어의 설계에 적용될 수 있을 것이다.<sup>(10)</sup>

### 참 고 문 헌

- (1) Nishino, H., Sasai, H., Makino, K. and Sugawara, T., 1999, Aperture-grille Vibration Suppression in Diamondtron CRT, SID'99 DIGEST 8.3
- (2) Shadow mask for CRT, Japanese Patent 10-308182.
- (3) Ohmura, Y., Hashimoto, M. and Taguchi, H., 1999, "Effect of Damping Wire on Aperture Grill Vibration," IDW'99, pp. 481~484.
- (4) You, S. J., Shin, W. S. and Jang, B. W., 2000, "An Analysis of a Mask Vibration Considering Contact with a Damping Wire," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 46(2) pp. 385~389.
- (5) Kim, S. D., Kim, W. J., Lee, B. Y. and Lee, C. W., 2002, "Nonlinear Vibration Analysis of Thin Perforated Plate with Wire Impact Damping," Submitted to Journal of KSNVE.
- (6) Petyt, M., 1990, Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge Universal Press.
- (7) Roask, R. J. and Young, W. C., 1976, Formulas for Stress and Strain, McGRAW-HILL, pp. 516~517.
- (8) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., 1982, Theory of Elasticity, 3rd ed., McGRAW-HILL.
- (9) Higdon, A., 1979, Engineering Mechanics, Prentice Hall.
- (10) Kim, S. D., Kim, W. J. and Lee, C. W., 2002, "Experimental Verification of Analysis Model of the Shadow Mask with Damping Wires," Proceeding of KSNVE Spring Annual Conference, pp. 460~465.