

와이어와의 접촉을 고려한 마스크의 진동 해석

유세준*, 신운서*, 장보웅*

An Analysis of the Mask Vibration Considering the Damping Wire

Se Joon You *, Woon Seo Shin *, and Bo Woong Jang *

ABSTRACT

The vibration of a mask degrades the color purity in CRT. Therefore, a damping wire is put into contact with the mask to reduce the vibration in perfectly flat CRT. In this study, we analyzed the vibration of the mask contacting with the damping wire using FEM. First we calculated the natural frequencies and mode shapes of the mask by modal analysis, and compared them with the measured results to confirm our finite element model. The modal analysis of the wire was also performed to investigate resonance with the mask. Finally, the transient dynamic analysis of the mask contacting with the wire was performed. The vibration of the mask was measured to confirm our analysis, and the results are in good agreement with the analysis.

Key Words : CRT (음극선관), Howling (하울링), Natural frequency (고유 진동수), Mode shape(모드 형상), Vacuum (진공), Resonance (공진)

기호설명 ζ_i : i-th mode damping ratio

[M] : mass matrix
 [C] : damping matrix
 [K] : stiffness matrix
 {u} : displacement vector
 {F} : force vector
 ω : natural circular frequency
 f_n : natural frequency
 ρ : density
 T : tension force
 α : viscous damping constant
 β : solid damping constant
 $\eta_i(t)$: principal coordinate
 $Q_i(t)$: i-th modal force

1. 서론

최근 PC 용 모니터에 사용되는 음극선관의 개발동향은 완전 평면화이다. 완전 평면 모니터는 시야 각이 넓고 난반사가 적어 눈의 피로가 덜하다는 장점이 있으므로 여러 업체들이 이를 개발하기 위하여 노력하고 있다. 그 중에서 본 해석에서 사용된 완전 평면 모니터의 개략적인 구조를 Fig.1 (b)에 나타내었다. 본 해석에서 사용된 완전 평면 모니터와 일반 모니터와의 큰 차이점 가운데 한가지는 마스크의 완전 평면 여부이다. 마스크가 완전 평면이 되기 위해서는 마스크가 인장된 상태에서 제작되어야 하기 때문에 마스크 지지체의

* LG 전자 Digital Display 연구소

구조가 일반 모니터와는 다른 형태로 이루어져야 한다. 즉 일반 모니터는 Fig.1 (a)와 같이 마스크가 용접 되어 있는 프레임이 스프링을 통하여 패널에 고정되는 구조를 이루고 있는 반면에 완전 평면 모니터는 마스크를 인장 시켜 완전 평면상태로 만든 후 패널에 고정된 레일에 직접 용접하는 구조로 이루어져 있다. 따라서 완전 평면 모니터에서 사용되는 마스크를 일반 마스크와 구별하여 텐션 마스크라 부르기도 한다.

일반적으로 음극선관에 있어서 스피커나 외부 충격등에 의해 마스크가 진동하여 화질이 저하되는 현상을 하울링(howling) 현상이라 한다. 일반 모니터의 경우는 패널과 프레임이 스프링으로 연결되어 있고 마스크에 곡률이 있으므로 하울링 현상이 심각하지 않다. 그러나 본 해석에서 사용된 완전 평면 모니터의 경우는 스프링을 사용할 수 없고 마스크가 완전 평면 형태를 취하고 있으므로 일반 모니터와 비교하여 하울링 현상에 좀더 취약하다는 문제점을 가지게 된다. 이러한 문제점을 해결하고자 Fig.1 (b)와 같이 와이어를 부가하여 마스크의 운동에너지를 와이어와의 충돌에너지로 변환시켜 마스크의 진동을 저감 시키도록 하고 있다. 그런데 와이어에 의한 진동 저감 효과는 와이어의 여러 인자들의 변화에 따라 차이가 많이 나게 된다. 따라서 진동 저감 효과가 최대가 될 수 있도록 와이어의 인자들의 값을 결정하는 해석과 측정 방법에 대한 연구가 필요하게 되었다.

기존의 곡률이 있는 마스크에 대해서 Taguchi⁽¹⁾는 모드해석기술을 기초로 하여 마스크의 진동 문제에 대하여 실험적인 방법으로 접근하였고 Saita⁽²⁾는 마스크와 주위 구조물과의 공진 현상에 대한 연구를 실시하였다. Nishino⁽³⁾는 진공 상태에서의 마스크의 진동을 측정하는 방법을 연구하였다. 그러나 기존의 연구는 주로 모드 해석에 치중되었고 연구 대상도 본 해석에서 사용된 모델과 다른 구조로 이루어져 있다. 따라서 본 해석의 경우와 같이 인장된 완전 평면 마스크가 와이어와 충돌하면서 진동하는 것을 해석할 수 있는 방법과 진공 상태에서의 마스크의 변위를 측정하여 평가할 수 있는 방법에 대한 필요성이 제기 되었다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 와이어와의 충돌이 고려된 마스크의 진동 해석을 실시하였다. 진동해석의 준비 단계로 모드 해석을 실시하여 고유 진동수와 모드 형상을 구하고 이를

측정결과와 비교하여 유한 요소 모델에 대한 타당성을 확보하였다. 검증된 유한 요소 모델을 사용하여 와이어와의 충돌이 고려된 마스크의 진동 해석을 실시하였으며 측정을 통하여 검증하였다. 특히 마스크의 진동 측정에 있어서는 진공상태에서 측정할 수 있는 시스템을 개발하여 공기 감쇠 효과를 배제시키도록 했다.

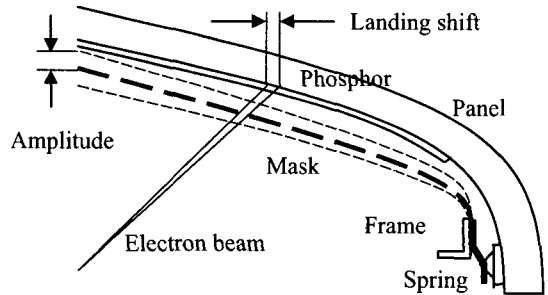


Fig. 1(a) Schematic figures for landing shift due to the mask vibration in conventional CRT

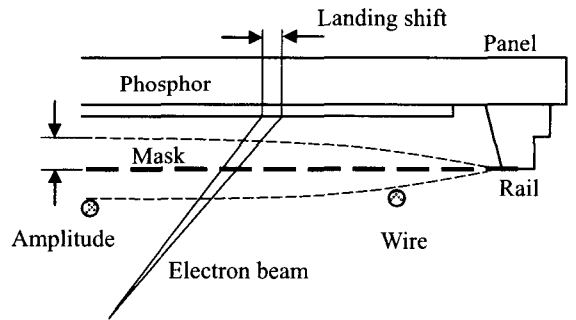


Fig. 1(b) Schematic figures for landing shift due to the mask vibration in perfectly flat CRT

2. 유한 요소 해석

2.1 유한 요소 모델링

유한 요소 모델링에 있어서는 해석 시간의 단축을 위해서 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 추정되는 요소들은 생략하고 마스크와 와이어만 모델링 하였다. 그리고 해석 대상 모델이 상하좌우 대칭 형상이므로 완전 모델링을 실시하지 않고 1/4 모델링만 실시 하였다.

실제 마스크의 경우는 전자 빔이 통과 하는 구멍들이 수없이 많이 존재하지만 이 구멍들을 모

텔링 한다는 것은 불가능한 일이다. 따라서 본 해석에서는 모델링 시에는 이 구멍들을 고려하지 않으면서 해석 시에는 구멍들이 있는 것과 같은 효과를 얻기 위하여 유효 물성 치⁽⁴⁾를 구하여 사용하였다. 유효 물성 치를 구하기 위해서는 Fig.2 와 같이 최소 대칭 형상을 3 차원으로 모델링한 후 적절한 경계 조건을 부가하여 구할 수 있다. Table 1 은 마스크 원 재질의 물성 치와 유효 물성 치를 비교한 것이다. 구멍의 형상으로 인하여 y 방향의 유효 물성 치가 x 방향의 유효 물성 치보다 약 3.6 배 정도 큰 직교 이방성을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

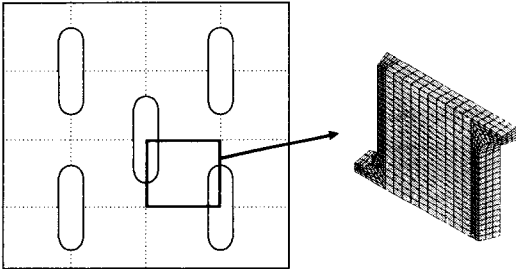


Fig. 2 Finite element model for effective material properties

Table 1 Comparison of material properties of the mask

	Original	Effective
$E_x(N/mm^2)$	22×10^4	4.5153×10^4
$E_y(N/mm^2)$		16.547×10^4
ν_{yx}	0.25	0.071
ν_{xy}		0.2599
$\rho(kg/mm^3)$	7.85×10^{-6}	6.28×10^{-6}

2.2 모드 해석

본 연구에서는 범용 유한 요소 프로그램인 ANSYS 를 사용하여 해석을 실시 하였다. 일반적으로 다 자유도 감쇠 진동계의 운동 방정식을 행렬식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$[M]\{u\} + [C]\{u\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

식 (1)에서 외력이 작용하지 않고 감쇠가 없다고 가정하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{u\} + [K]\{u\} = 0 \quad (2)$$

식 (2)에서 변위벡터 {u}를 조화함수라고 가정하여 정리하면 식 (3)을 얻을 수 있으며 식 (3)에서 고유 원 진동수 ω 를 구할 수 있다.

$$[K] - \omega^2[M] = 0 \quad (3)$$

와이어의 경우는 현이라고 가정할 수 있고 양단이 고정된 현의 고유 진동수는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (4)$$

마스크의 경우는 굽힘에 대한 저항력이 없이 인장력에 의한 복원력만이 작용하는 상태이므로 막이라고 가정할 수 있고 네 변이 모두 고정된 사각형 막의 고유 진동수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{mn} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (5)$$

2.3 진동 해석

마스크의 진동을 해석하기 위해서는 다음과 같은 네 가지의 해석 단계를 순차적으로 수행하여야 한다. 첫번째는 마스크가 레일에 용접 되어지는 마스크의 인장 해석 단계이다. 두 번째는 진동 저감을 위해 레일에 일정한 인장력 값으로 용접 되어지는 와이어의 인장 해석 단계이다. 세 번째는 마스크를 가진 하기 위하여 마스크의 중앙에 와이어의 위치와 반대 방향으로 일정한 힘을 인가하는 해석 단계이며 이때의 주응력 분포를 나타낸 것이 Fig.3 이다. 마지막은 중앙부에 인가된 힘을 제거하여 마스크를 자유 진동 하게 만들어 마스크가 와이어와 충돌하면서 운동 에너지가 점차 감소 되는 것을 해석하는 단계이다. 이러한 해석 과정의 흐름도를 나타낸 것이 Fig.4 이다.

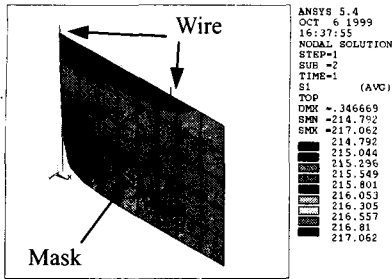


Fig. 3 Principal stress distribution of the mask

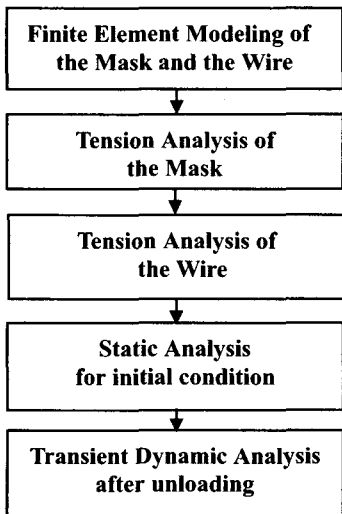


Fig. 4 Flow chart for transient dynamic analysis

시스템의 감쇠 비를 정의하는데 있어 식 (1)의 감쇠 행렬 $[C]$ 를 비례 감쇠라고 가정하면 식 (6)과 같이 점성 감쇠 계수 α 와 구조 감쇠 계수 β 로 나타낼 수 있다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (6)$$

식 (6)을 식 (1)에 대입한 후 주좌표(principal coordinate)에 대하여 변환하고 행렬식을 정리하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\eta}_i(t) + (\alpha + \beta\omega_i^2)\dot{\eta}_i(t) + \omega_i^2\eta_i(t) = Q_i \quad (7)$$

식 (7)에서 식 (8)을 얻을 수 있으며

$$2\zeta_i\omega_i = \alpha + \beta\omega_i^2 \quad (8)$$

본 해석에서 사용된 모델과 같은 경우 점성 감쇠는 없다고 가정할 수 있으므로 구조 감쇠 계수 β 는 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{2\zeta_i}{\omega_i} \quad (9)$$

3. 측정

3.1 모드 형상 측정

해석 모델의 타당성을 검증하기 위하여 마스크의 고유 진동수와 모드 형상을 측정하였다. 측정 방법은 Fig.1의 (b)와 같은 간단한 형태의 샘플을 제작한 후 패널의 마스크가 부착된 반대 위치에 스피커를 고정시켜 주파수를 변경시켜 가면서 가진 하여 측정하는 방법을 택하였다. 측정 장비는 Electronic Speckle Pattern Interference (ESPI)라는 것을 사용하였다. ESPI는 빛의 간섭 효과를 이용하는 비접촉 다점 변위 측정계로 마스크면 전체를 한번에 측정할 수 있다. 따라서 마스크를 유한 요소로 나누고 각 절점에서의 측정 결과를 종합하여 모드 형상을 구하는 기존의 측정 장비에 비하여 측정 시간을 단축시킬 수 있는 장비이다.

3.2 마스크 진동 측정

마스크는 질량은 작은 대신에 면적이 넓기 때문에 대기중에서 마스크의 진동을 측정하면 공기 감쇠 효과에 의해 실제 진공 상태인 음극선관 내부보다 감쇠 효과가 훨씬 크게 일어나는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 형광체가 도포 되지 않은 음극선관 샘플을 제작한 후 Fig. 5와 같은 측정 시스템을 사용하여 측정하는 방법을 사용하였다. 측정 위치는 마스크의 중심을 원점이라고 가정했을 때 x 축을 따라 여섯 곳에서 측정하였다.

자세한 측정 방법은 다음과 같다.

- ① 샘플과 레이저 센서를 방진 테이블 위의 지그에 고정시킨다.
- ② 일정한 충격량을 줄 수 있는 진자를 이용하여 패널에 충격을 주어 마스크를 가진 시킨다.
- ③ 이때의 마스크의 거동을 레이저 센서로 측정한다.
- ④ 레이저 센서에서 나온 신호를 저주파수 대역 통과 필터를 거쳐 잡음 성분을 제거한 후 레이저 구동계로 보낸다.
- ⑤ 레이저 구동계에서 일정한 전압 값으로 변환

- 하여 디지털 오실로스코프로 보낸다.
- ⑥ 디지털 오실로스코프에서 진동 파형을 확인 하면서 데이터 파일로 저장한다.
 - ⑦ 측정 지점을 변경하여 같은 방법으로 측정한다.

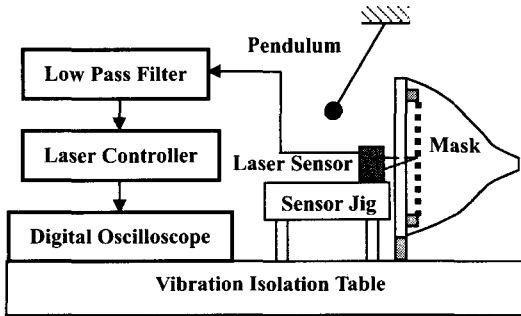


Fig. 5 The mask vibration measurement system

4. 결과 및 고찰

Table 2 는 와이어와 마스크의 고유 진동수 해석 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. 전체적으로 해석 치가 측정 치보다 크지만 큰 차이가 없으므로 해석에서 사용한 유한 요소 모델이 타당하다는 것을 알 수 있다. 와이어의 경우는 1 차 고유 진동수가 마스크의 3 차 고유 진동수와 유사한 범위에 존재하므로 와이어의 인장력이나 직경이 변하여 고유 진동수가 낮아진다면 마스크와 공진 현상이 발생할 수 있을 것으로 추정된다.

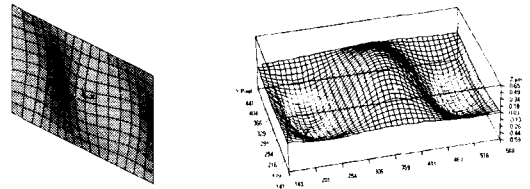
Table 2 Natural frequency of the mask and the wire

	Wire	Mask	
		Analysis	Experiment
1st(Hz)	571	355.2	331
2nd(Hz)	1153	430.2	408
3rd(Hz)	1715	531.9	483

Fig.6 은 마스크의 3 차 모드 형상을 해석과 측정으로 구한 결과인데 잘 일치하고 있다. 마스크의 x 방향 길이가 y 방향에 비하여 길고 y 방향의 탄성 계수가 x 방향의 탄성 계수보다 큰 직교 이방성이므로 3 차 모드에서도 x 방향의 모드가 나타난다는 것을 알 수 있다.

Fig.7 은 마스크의 중앙을 원점이라고 했을 때 x=128mm, y=0mm 인 위치에서 와이어가 없는 경우

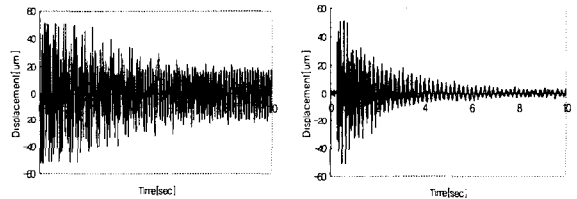
와 와이어가 3 개인 경우의 마스크의 진동을 측정을 통하여 구한 결과이다. 와이어가 없는 경우 10 초가 지나도 진동이 계속되지만 와이어가 3 개인 경우는 와이어와 마스크간의 충돌로 인하여 마스크의 진동에너지가 감소하여 10 초 이내에 진동이 사라지는 결과를 나타내고 있다



(a) Analysis

(b) Experiment

Fig. 6 The third mode shape of the mask

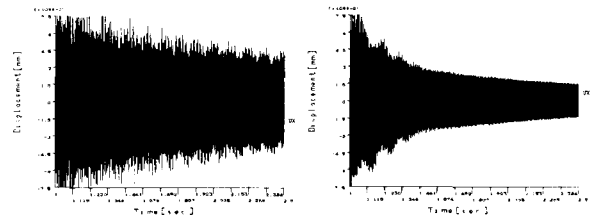


(a) No - wire

(b) 3 - wire

Fig. 7 Experiment result of the mask vibration at x=128

Fig.8 은 같은 위치에서 1.5 초 까지 해석한 결과로 와이어가 3 개인 경우는 와이어가 없는 경우와 비교하여 진동이 약 50%정도 저감 된다. 초기 변위와 측정 시간이 다르기 때문에 측정 결과와 직접적인 비교를 할 수는 없지만 와이어에 의한 진동 저감 효과가 잘 나타나 있고 전체적인 진동 파형이 유사하므로 해석 결과가 타당하다고 할 수 있다.

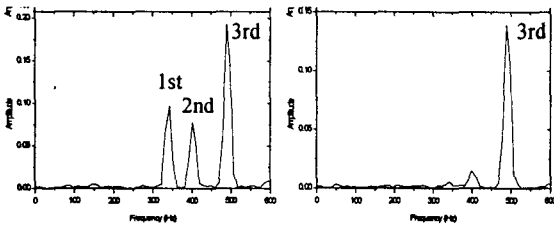


(a) No - wire

(b) 3 - wire

Fig. 8 Analysis result of the mask vibration at x=128

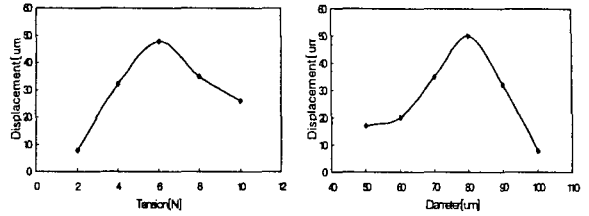
Fig.9는 와이어가 없는 경우의 측정 데이터를 FFT 분석한 것이다. 3초 후에는 Fig.9 (a)와 같이 3차까지의 모드가 모두 나타나지만 10초 후에는 Fig.9 (b)와 같이 1차와 2차 모드는 사라지고 3차 모드만이 존재하게 된다. 이러한 현상은 거의 모든 측정 지점에서 일어나는 공통된 현상으로 본 해석에서 사용된 마스크의 경우 3차 모드가 지배적인 모드라는 것을 의미한다. 따라서 와이어를 사용하여 마스크의 진동을 저감 시키기 위해서는 3개의 와이어를 사용하는 것이 가장 효과적인 방법이라는 것을 알 수 있다.



(a) After 3 sec. (b) After 10 sec.
Fig. 9 FFT result of the mask vibration at x=128

Fig.10의 (a)는 와이어의 직경은 70 μm 의 일정한 값으로 고정시킨 상태에서 인장력만을 변화시켜 해석한 결과이다. 인장력이 6N보다 큰 경우에는 인장력이 커지면 진폭이 감소하지만 6N보다 작은 경우는 인장력이 증가할수록 진폭이 오히려 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 와이어의 1차 고유 진동수가 495Hz로 마스크의 3차 고유 진동수인 531Hz와 유사하여 공진이 일어나기 때문에 생기는 현상으로 추정 할 수 있다.

Fig.10의 (b)는 와이어의 인장력은 8N의 일정한 값으로 고정시킨 상태에서 직경만을 변화시켜 해석한 결과이다. 직경이 80 μm 보다 큰 경우는 직경이 커지면 진폭이 감소하지만 80 μm 보다 작은 경우는 직경이 커질수록 진폭이 오히려 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것도 와이어의 직경이 80 μm 인 경우 와이어의 1차 고유 진동수가 500Hz가 되어 마스크의 3차 고유 진동수와 유사하여 공진이 일어나기 때문에 생기는 현상으로 추정 할 수 있다. 따라서 와이어의 직경과 인장력을 선택할 때는 마스크와 공진현상이 일어나지 않도록 선택하여야 하며 직경과 인장력이 작은 경우가 생산성면에서는 좀더 바람직하다고 할 수 있다.



(a) Tension force change (b) Diameter change
Fig. 10 Analysis result of the wire sensitivity

5. 결론

와이어와의 충돌을 고려하여 인장된 완전 평면 마스크의 진동을 해석하는 기법을 제시하였고 측정 결과와 비교 분석하여 타당성을 입증하였다. 또한 측정에 있어서는 레이저 센서를 이용하여 공기 감쇠 효과가 없는 진공상태에서의 마스크의 진동을 측정하는 방법을 제시하였다. 와이어의 직경과 인장력을 변경시킨 해석을 통하여 와이어의 진동 저감 효과를 향상시키기 위해서는 마스크와 공진 현상이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 측정 결과의 FFT 분석을 통하여 완전 평면 마스크의 경우 진동을 저감시키기 위해서는 3차 모드를 저감시키는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. H.Taguchi, K.Seto, F.Doi and M.Ren, "Vibration Analysis of Trinitron Aperture Grille," SID 98 Digest, pp. 347-351, 1998.
2. Koji Saita, "Vibration Analysis of Trinitron Aperture Grille," Euro Display , pp. 497-499, 1996.
3. H.Nishino, H.Sasai, K.Makino and T.Sugawara, "Aperture-Grille Vibration Suppression in Diamondtron CRT," SID 99 Digest, pp. 66-69, 1999.
4. Woon Seo Shin, Se Joon You and Bo Woong Jang, "국부 가열에 의한 Tension mask의 열변형 해석 및 전자 빔의 오차 예측," 한국 정밀공학회지 Vol. 16, No. 8, pp. 138~148, 1999.
5. Robert F.Steidel, "An Introduction to Mechanical Vibrations," 2nd edition, 1977.
6. 한국 소음 진동 공학 회, "소음 진동 편람," pp. 229~328, 1995.