論文94-31B-6-10

쉐도우마스크의 열변형과 전자빔의 오착 해석

(Analysis of Thermal Deformations of Shadow Mask and Electronic Beam Mislanding)

金 炫 圭*, 朴 英 鎬**, 金 相 基**, 林 世 英***

(Hyun Gyu Kim, Young Ho Park, Sang Ky Kim and Se Young Im)

要 約

본 연구는 Braun tube 안에 있는 쉐도우마스크의 열변형을 유한요소법으로 해석을하고 화면에서의 전자빔 오착(beam landing shift)을 계산하였다. 전자빔이 원하는 발광체에만 도달하기 위해서 쉐도우마스크에는 무수히 많은 구멍이 있는데 열변형으로 인해서 전자빔의 도달위치가 변하게 되고 화면의 색을 어긋나게 한다. 실제 해석에서 우선 유효 열전달계수와 유효 탄성계수를 이용하여 쉐도우마스크를 구멍이 없는 곡면으로 모델하였고 열전달 문제를 풀기위해 비선형 유한요소 방법을 이용하였다. 열전달 해석의 결과를 이용해서 열변형 해석을 하고 전자빔의 오착을 계산하게 된다. 이와같은 해석을 통해서 쉐도우마스크의 설계에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

Abstract

Finite element analysis is performed for transient thermal deformation of a shadow mask inside the Braun tube and the landing shift or mislanding of the electronic beam is calculated. The shadow mask has numerous slits through which the electronic beams are guided to land on the designed phosphor. Its thermal deformations therefore cause the mislanding of the electronic beam and result in decolorization of a screen. For realistic finite element analysis, firstly the effective thermal conductivity and the effective elastric modulus are calculated, and the shadow mask is modeled as shell without slits. Next the nonlinear finite element formulation is developed for transient heat transfer on the shadow mask, wherein thermal radiation is a major heat transfer mechanism. Analysis of the resulting thermoelastic deformations is followed, from which the mislanding of the electronic beam is obtained. The present finite element scheme may be efficiently used for thermal deformation design of a shadow mask.

* 正會員, 韓國科學技術院 機械工學科 大學院
(Dept. of Mech. Eng., KAIST)
** 正會員, 오리온전기(주) 영상관연구소
(R & D CENTER)
*** 正會員, 韓國科學技術院 機械工學科

※ 본 연구는 오리온전기주식회사의 지원으로 이루어 졌음을 밝히고 관계자 여러분들에게 감사드립니다.
接受日字 : 1993年 9月 4日

Ⅰ. 서 론

칼라 텔레비전(color T.V.)의 크기가 대형화하고 화면의 해상도가 높아지면서 쉐도우마스크(shadow mask)의 열변형이 중요한 문제가 되었다. 쉐도우마스크는 전자총에서 나온 전자빔의 일부를 원하는 발광체에 도달하게 만드는 얇은 차단막으로 수 십 만개의 작은 구멍들이 존재한다. 전자총을 떠난 전자빔이 쉐도우마스크에 도달하면 일부(20~30%)는 구멍을 통해 통과하고 나머지는 쉐도우마스크에 충돌하게 된다. 쉐도우마스크와 충돌한 전자빔은 열에너지로 변환되어 면 내의 열전도와 표면에서의 열복사를 통해서 열전달이 일어나고 시간이 지나면서 열입력과 열복사가 평형을 이루게 된다. 쉐도우마스크의 온도가 상승하면 열팽창으로 인한 열변형이 발생하여 전자빔이 화면에 도달하는 위치가 변하게 되고 원하지 않는 곳에 전자빔이 도달하면 다른 색의 발광체에 영향을 주게 되어 화면의 색이 어긋나게 되는데 특히 대형 고화질의 C.R.T.(Cathode Ray Tube)에서 큰 문제가 되고 있다.[1] 색번짐이 없는 선명한 화질의 화상을 얻기 위해서는 쉐도우마스크의 열변형을 정확히 계산할 필요가 있을 것이다.

열변형은 면에 수직인 변형과 면 방향의 변형이 생기는데 지지강쇠(support spring)가 쉐도우마스크 전체를 화면 방향으로 이동시키는 보정을 통해서 전자빔의 도달 위치를 원하는 위치가 되도록 하고있다. 보정 방법에는 크게 바이메탈방식(bimetal system)과 구석지지방식(conner suspension system)이 있다. 바이메탈방식의 경우 온도가 올라가면 지지강쇠에 붙어있는 바이메탈이 굽게되어 보상하는 것으로 소형 기종에서 주로 사용되고 있고 대형 기종에서는 열팽창되는 양이 많기 때문에 이로 인한 지지강쇠의 변형을 원하는 방향으로 발생시켜 보상하는 구석지지 방식이 주로 채택되고 있다.

쉐도우마스크에 있는 무수히 많은 구멍들을 고려하기 위해서 유효 열전달계수(effective conductivity)와 유효 탄성계수(effective modulus)를 이용하여 해석을 하였다. 즉, 구멍이 있는 구조물을 구멍이 없는 것으로 가정해서 열전달 해석과 구조 해석을 하는데, 재료상수들을 적당한 값으로 하여 같은 거동을 보이게 하는 것이다. 구멍이 두께 방향과 위치에 따라서 크기와 모양이 변하고 단순한 형상이 아니므로 해석적인 방법으로 유효 재료상수들을 구하기는 어렵다. 두께 방향으로 구멍의 크기가 변하는 것을 고려하기 위하여 쉐도우마스크를 몇 개의 층으로 나누고 각 층을 대표 할 수 있는 구멍의 형상을 선정한 다음 유한요소법을 이용하여 근사적인 값들을 구하였다.

열복사와 열전도가 주요 열전달 메카니즘인 쉐도우마스크의 열전달해석에 비선형 유한요소법(non-linear F.E.M.)을 적용함으로써 비선형 거동인 열복사를 고려할 수 있었고 시간에 따른 온도분포는 물론 이 결과로부터 열변형과 전 화면에 대한 전자빔의 오착(beam landing shift)을 계산하는 프로그램을 작성하였다. 온도분포 해석과정에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [6] 에 주어져 있고 본 논문에서는 간략한 설명만 하였다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 쉐도우마스크의 비선형 열전달 해석과 열변형 해석을 하고 이 결과를 이용해서 화면에서의 빔오착을 계산하였다. 예제로 바이메탈 방식의 21″ FST(Full Square Tube) 쉐도우마스크에 대하여 각 시간별로 온도분포와 빔의 오착을 계산하였고 실제 측정결과와 비교를 하였다.

Ⅱ. 쉐도우마스크의 기본설명

C.R.T.(Cathod Ray Tube) 벽면의 재질은 유리로 되어있고 화면의 안쪽면에는 형광물질이 도포되어 있다. 전자총에서 화면의 정보를 담은 전자빔이 차례로 나오게 되면 편향코일(deflection coil)에 의해서 전자빔이 굽게되어 원하는 위치에 도달하게 된다. 쉐도우마스크는 화면의 바로 안쪽에 위치하는데 일반적으로 평면이 아니고 곡률을 갖는 곡면으로 되어있다.

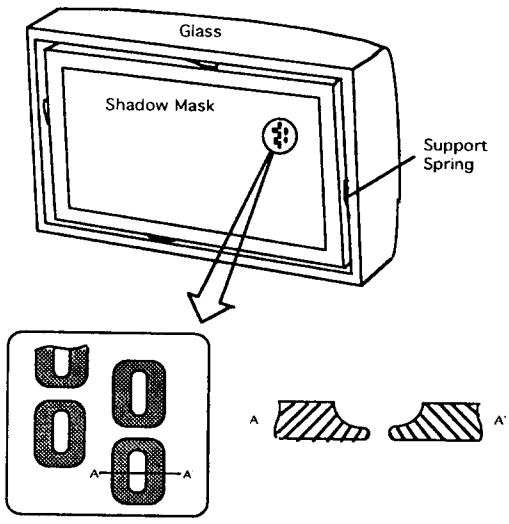

그림 1. 쉐도우마스크가 장착된 모습과 구멍의 모습
Fig. 1. Side view of shadow mask assembly and aperture geometry.

쉐도우마스크는 프레임(frame)과 몇 곳에서 점용접이 되어 있고 프레임의 옆면에는 지지강쇠(support spring)가 있어 C.R.T. 벽면에 나아있는 돌출물(stud)에 끼워져 있다. 쉐도우마스크에는 수 십 만개의 작은 구멍들이 있는데 전자빔의 산란을 막기위해 전자총에서 바라본 곳은 좁고 화면방향으로 갈수록 넓어지는 3차원 형상을 하고 있다 보통 구멍은 슬릿(slit) 형태로 되어있고 구멍의 크기나 형상은 위치에 따라서 다르게 된다. 그림 1에 쉐도우마스크의 전체 모습과 구멍의 모습이 있다.

열변형의 보정은 바이메탈방식과 구석지지방식이 있는데 바이메탈방식은 온도상승으로 인한 바이메탈의 변형을 이용하는 것이고 구석지지방식은 강쇠의 형상에 의해서만 보상을 하는 것이다. 그림 2에 보상강쇠에 의해서 빔의 오착을 보정하는 모습이 있다.

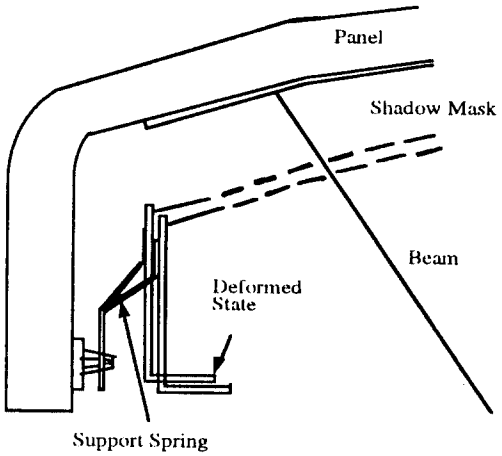

그림 2. 지지강쇠에 의한 전자빔 오착의 보정
Fig. 2. Compensation of beam mislanding by the support spring.

전자총에서 나온 전자빔은 화면의 정보를 순서적으로 갖고 있는데 화면의 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이면서 전자빔이 화면에 부딪히게 된다. 전자빔이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하는 동안 조금씩 아랫방향으로 이동하게 되고 오른쪽 끝에서 다시 왼쪽 끝으로 오는 동안에는 전자빔의 방출이 멈추게 된다. 한 화면을 만든 후에는 다시 원 위치로 전자빔이 돌아가게 되는데, 이 경우에도 전자빔의 방출이 멈추게 된다. 화면에서 수평방향의 회귀를 수평회귀(horizontal retrace)라 하고 수직방향의 회귀를 수직회귀(vertical retrace)라 한다. 현재 방송중인 T.V.는 525 줄에 초당 30 화면을 만든다.

Ⅲ. 쉐도우마스크의 열변형 해석과 빔의 오착 계산

1. 쉐도우마스크의 형상

쉐도우마스크의 형상은 하나의 함수로 표현하기 어렵고 일반적으로 몇 개의 곡률반경을 이용하여 나타내고 있다. 쉐도우마스크 마다 표현방법에 차이가 있기 때문에 곡면의 대표적인 위치 값들을 갖고 나머지 부분을 표현할 수 있는 Bezier 곡면 방법을 사용하였다. 식 (1)에 Bezier 곡면에 대한 표현식이 나타나 있다.[5]

$$f(x,y)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}f(x_i,y_j)J_{n-1,j-1}(u)J_{m-1,i-1}(w) \qquad (1)$$

여기서 $J_{n,i}=\binom{n}{i}u^i(1-u)^{n-i};0\le u,w\le 1$

2. 열입력의 계산

전자총에서 나온 전자빔의 세기는 시간에 따라서 다르고 쉐도우마스크를 지나가는 선속도도 위치에 따라서 조금씩 달라질 것이다. 본 연구에서는 위치에 상관없이 같은 선속도를 사용하였고 전자빔의 세기는 평균적인 값을 사용하였다.

전자총에서 나온 전자빔이 쉐도우마스크를 지날때 일부만 구멍을 통과하고 나머지는 쉐도우마스크와 충돌하여 열에너지로 변환된다. 전자총에서 나오는 출력(power)은 C.R.T. 내부에 가하는 전압에 전자총의 전류를 곱하면 계산이되고 순수하게 쉐도우마스크에 도달하는 전자빔은 구멍 크기에 따라 정해진다. 전자빔이 수평방향으로 회귀하는 경우나 수직방향으로 회귀하는 동안에는 방출되지 않는 것과 마스크 크기보다 더 넓은 영역을 주사하므로 프레임에도 열입력이 있으므로 이것들을 고려해야 한다.

$$q_{in}=\frac{\alpha P}{A_{mask}}(1-e_h)(1-e_v)\left(1-\frac{A_s}{PH\times PV}\right) \qquad (2)$$

여기서 P : 쉐도우마스크에 들어오는 전자총의 출력(power),
A_{mask} : 쉐도우마스크 전체 면적,
A_s : 구멍의 면적,
e_h : 수평 회귀 시간 / 1줄을 만드는데 걸리는 시간,
e_v : 수직 회귀 시간 / 1화면을 만드는데 걸리는 시간,
PH, PV : 구멍의 수평 pitch와 수직 pitch.

3. 열복사

쉐도우마스크에 들어온 열은 내부에서는 전도를 하

고 표면에서는 복사를 하게되는데, 전체적으로 볼때 대부분의 열은 복사를 통해서 빠져 나가고 표면에서 방출된 열은 C.R.T. 내부벽면에 도달하여 주변의 온도를 올리게 된다. 열복사를 정확하게 계산하기 위해서는 열복사에 대한 복잡한 방정식을 전체 C.R.T.에 대하여 해석을 하여야 하나 이 계산이 단순하지가 않고 많은 계산시간을 요구하므로 여기서는 쉐도우마스크를 둘러싸고 있는 벽면을 흑체(black body)로 가정하고 평균적인 주변온도(surrounding temperature)를 사용하였다. 구멍에서는 열복사가 없으므로 구멍의 면적을 고려한 단위 면적당 나가는 열은 식 (3)과 같고 이 식은 유한요소법에 적용할 수 있다.

$$q_{out} = \left(1 - \frac{A_s}{PH \times PV}\right)\{\epsilon_1 \sigma(T^4 - T_{s1}^4) + \epsilon_2 \sigma(T^4 - T_{s2}^4)\} \quad (3)$$

여기서 ϵ_1, ϵ_2 : 앞면과 뒷면의 방사율(emissivity),
T_{s1}, T_{s2} : 앞면과 뒷면의 주변 온도,
s : Stefan-Boltzmann 상수
$(= 5.669 \times 10^{-8}\ W/m^2K^4)$.

4. 유효 탄성계수와 유효 열전달계수

열변형 해석에서 쉐도우마스크에 있는 무수한 구멍들의 영향을 고려하기 위해서 유효 열전달계수와 유효 탄성계수를 계산하였다. 해석적인 방법으로 유효 재료상수들을 구하기는 어려우므로 수치적인 방법을 통해서 계산하였는데 위치와 두께에 따라서 구멍의 크기가 달라지므로 여러곳의 유효 재료상수들을 계산하였다. 쉐도우마스크 안에서 구멍의 형상을 표현할 수 있는 부분을 그림 3와 같이 선택하고 선택한 모델에 적절한 경계조건을 주어 해석을 하면 근사적인 값을 구할 수 있다.

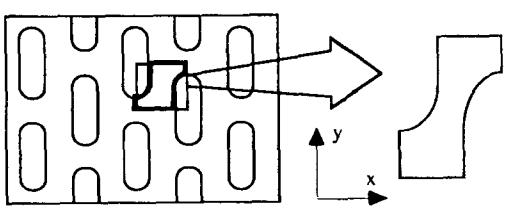

그림 3. 유효재료상수를 위한 모델
Fig. 3. Models for effective material constants.

x 방향의 유효 열전달계수를 구하기 위하여 윗면과 아랫면은 단열을 하고 오른쪽면의 온도를 고정시킨다. 그리고 왼쪽면에 열을 가한 문제를 풀게 되면 왼쪽면과 오른쪽면의 온도 차이가 나오게 되므로 유효 열전달계수를 계산할 수 있다. y 방향의 경우도 왼쪽면과 오른쪽면을 단열하고 아랫면에 열을 주어 계산할 수 있다. 유효 탄성계수를 구하기 위하여 왼쪽면의 x 방향을 아랫면의 y 방향을 고정하고 오른쪽면에는 일정한 변위를 주었다. 윗면과 오른쪽면은 대칭면으로 쉐도우마스크가 변형을하여도 직선으로 남아있게 되므로 윗면의 변위는 일정한 값을 갖는다는 구속을 주어 계산을 하면 오른쪽면의 반력을 계산할 수 있고 오른쪽면의 변위와 반력을 알 수 있으므로 유효 탄성계수를 구할 수 있다.

유효 열전달계수와 유효 탄성계수는 쉐도우마스크의 여러 층에서 계산을 하게 되는데, 각 층에서 구한 값들의 평균값을 취하여 이용하여도 되지만 조금 더 정확하게 계산하기 위하여 재료성질이 다른 여러 층으로 가정하여 계산하였다. 쉐도우마스크를 몇 개의 층으로 나누고 각 층을 대표할 수 있는 구멍의 형상을 선정한 다음 각각에 대한 유효 계수들을 유한요소법으로 계산하였다. 3층으로 가정하였을 경우의 모양이 그림 4 에 주어져 있다.

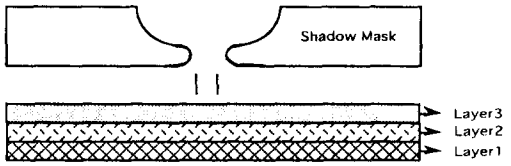

그림 4. 쉐도우마스크를 재료성질이 다른 3개의 층으로 가정한 모습
Fig. 4. Assumption shadow mask into 3 layers dissimilar materials.

5. 전자빔의 오착계산

전자총에서 나온 전자빔은 편향코일에 의해서 원하는 방향으로 굽게 되는데, 열변형으로 인한 빔의 오착을 정확하게 계산하기 위해서는 모든 전자빔의 궤도를 알아야 한다. 본 연구에서는 모든 전자빔이 편향중심(deflection center)에서부터 직선 운동을 한다고 가정하였다. 우선은 열변형이 없는 상태에서 전자빔의 궤도와 화면의 곡면이 만나는 곳을 식 (4)와 같은 반복계산에 의해서 구하고 열변형 후에 변경된 전자빔의 궤도와 화면의 방정식을 같은 방법으로 풀어서 전자빔의 오착을 계산하였다.

$$z - g(x) = 0; x = (x, y)$$
$$x^{(i+1)} = x^{(i)} + \frac{g(x^{(i)})}{\nabla g(x^{(i)})} \quad (4)$$

여기서 g(x)는 화면의 표현식이고 윗첨자 i는 반복계산을 나타낸다.

Ⅳ. 유한요소법에의한 쉘(shell) 구조물의 열변형 해석

유한요소법을 이용하여 쉘(shell) 구조물을 해석하는 방법에는 여러가지가 있는데 여기서는 Degenerate 요소방법[4] [6]을 이용하였다. 이 방법은 복잡한 쉘 이론을 적용하지 않고 3차원 요소의 좌표와 거동을 5개의 자유도와 2차원 형상함수(shape function)로 표현한 것이다. 절점(node)당 3개의 변위와 3개의 회전자유도를 갖고 있고 변형전에 단면에 있던 직선은 변형 후에도 직선으로 남는다는 가정을 사용하였다. 쉘의 중앙 면(mid-plane)에서의 변위와 윗면과 아랫면을 연결하는 벡터에 수직인 두 벡터의 회전을 갖고 내부의 모든 변위를 표현하였다. 쉘은 곡률을 갖고 있는 얇은 구조물로서 국부(local) 좌표계와 전체(global) 좌표간의 변환을 통하여 강성행렬(stiffness matrix)을 구성한다.

1. 요소(element)의 좌표

중간면(mid-surface)의 좌표는 2차원 형상함수(shape function)만 갖고 표현이 되지만 다른 부분의 좌표에 대한 것은 절점(node) 좌표만 가지고 표현할 수 없고 쉘의 두께와 각 절점에서 아랫면과 윗면을 연결하는 단위벡터들을 형상함수로 내삽하여 표현한다. V_3는 k-Node에서 아랫면과 윗면을 연결하는 단위벡터이고 식 (5)을 사용하여 내부의 모든 좌표를 표현할 수 있다.[4]

$$x_i(\xi,\eta,\zeta)=\sum_{k=1}^{n}N^k(\xi,\eta)x_i^k+\sum_{k=1}^{n}\frac{t}{2}\zeta N^k(\xi,\eta)V_{3i}^k \qquad (5)$$

여기서 $N^k(\xi,\eta)$: 형상함수(shape function),
t : 쉘의 두께.

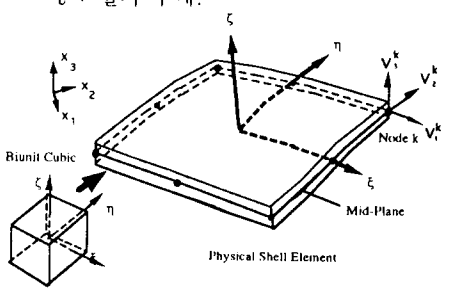

그림 5. 3차원 요소의 사상
Fig. 5. Mapping biunit element onto physical shell elemnt.

2. 온도와 변위

쉐도우마스크의 두께방향으로 전도에 의한 열전달은 작은양이므로 두께방향으로는 온도의 변화가 없다는 가정을 하여 온도분포를 표현하면 식 (6)와 같이된다.

$$\theta(\xi,\eta)=\sum_{k=1}^{n}N^k(\xi,\eta)\theta^k \qquad (6)$$

여기서 θ^k는 절점 k의 온도이다.

쉘 내부의 변위는 중간면에 서의 3개 변위(u_1, u_2, u_3)와 2개의 회전(α, β)을 이용하여 표현할 수있는데, 단면의 직선은 직선으로 남는다는 가정을 하였다. α^k가 양의 방향으로 회전을 하면 V_3^k는 V_2^k의 반대 방향으로 회전을 하게되고, β^k가 양의 방향으로 회전을하면 V_3^k는 V_1^k방향으로 회전을하게 된다. 즉 α^k와 α^k로서 단면이 회전하는 굽힘을 나타내게 된다.[4] [5] [6]

$$u_i(\xi,\eta,\zeta)=\sum_{k=1}^{n}N^k(\xi,\eta)u_i^k+\sum_{k=1}^{n}\frac{t}{2}\zeta N^k(\xi,\eta)(-V_{2i}^k\alpha^k+V_{1i}^k\beta^k) \qquad (7)$$

3. 열전달 방정식의 유한요소 수식화

요소(element) 곡면의 곡률이 작지 않을 경우 열전달의 지배방정식을 만들려면 여러가지 복잡한 수식이 포함되야 하나 곡률이 작을 경우는 평면에서의 열전달과 마찬가지로 근사할 수 있으므로 국부(local)좌표계에서 열전도와 열복사를 고려하여 지배방정식을 만들면 다음과 같다.

$$t\left(k_{11}\frac{\partial^2\theta}{\partial(x_1)^2}+k_{22}\frac{\partial^2\theta}{\partial(x_2)^2}\right)+q_{in}=pct\frac{\partial\theta}{\partial\tau}+\epsilon_1\sigma(\theta^4-\theta_{r1}^4)+\epsilon_2\sigma(\theta^4-\theta_{r2}^4) \qquad (8)$$

여기서 θ : 온도,
k_{11}, k_{22} : 국부좌표계의 열전도계수,
c : 비열(specific heat),
t : 쉘의 두께,
t : 시간.

위의 방정식을 가중함수(weighting function)를 이용하여 적분식으로 표현을 하고 비선형 항들을 선형화 하기위하여 $\theta^{n,i+1}=\theta^{n,i}+\Delta\theta^{n,i+1}$로 하여 1차항 까지 Taylor 전개를 하면 선형화된 방정식을 얻을 수 있고 시간에 대한 미분은 차분식을 이용하여 나타냈다.[3] 여기서 n은 시간간격(time step)수이고 i는 한 시간간격에서 반복계산의 반복(iteration)횟수이다.

$$(-)\int_A\left\{t\left[k_{11}\left(\frac{\partial\theta^{n,i}}{\partial x_1}+\frac{\partial\Delta\theta^{n,i+1}}{\partial x_1}\right)\frac{\partial w}{\partial x_1}+k_{22}\left(\frac{\partial\theta^{n,i}}{\partial x_2}+\frac{\partial\Delta\theta^{n,i+1}}{\partial x_2}\right)\frac{\partial w}{\partial x_2}\right]+qw\right\}dA$$

$$= \int_A \left\{ pct \frac{\theta^{(n,i)} + \Delta\theta^{(n,i+1)} - \theta^{(n)}}{\Delta\tau} w + \epsilon_1 \sigma((\theta^{(n,i)})^4 w + 4(\theta^{(n,i)})^3 \Delta\theta^{(n,i+1)} w - \theta_{s1}^4 w) \right.$$
$$\left. + \epsilon_2 \sigma((\theta^{(n,i)})^4 w + 4(\theta^{(n,i)})^3 \Delta\theta^{(n,i+1)} w - \theta_{s2}^4 w) \right\} dA \quad (9)$$

식 (9)에 형상함수(shape function)를 이용하여 표현을 하고 미지수인 $\Delta\theta^{(n,i+1)}$의 항을 왼편으로 하면 식 (10)를 얻을 수 있다. 쉘의 두께 t는 ζ 방향의 적분으로 바뀌고 구조해석에서의 변형률과 같은 차수의 다항식으로 내삽(interpolation) 되도록 열전달문제는 4 절점 요소를 사용하였다.

$$\sum_{b=1}^{n} \left[\int_A \int_{-1}^{+1} (k_{11} \frac{\partial N^a}{\partial x_1} \frac{\partial N^b}{\partial x_1} + k_{22} \frac{\partial N^a}{\partial x_2} \frac{\partial N^b}{\partial x_2}) j d\zeta\, dA + 4 \int_A (\epsilon_1 + \epsilon_2) \sigma \theta^3 N^a N^b j_s dA \right.$$
$$\left. + \int_A \int_{-1}^{+1} \frac{\rho c}{\Delta\tau} N^a N^b j d\zeta\, dA \right]^{(n,i)} \Delta\theta^{b(n,i+1)} = \int_A q N^a j_s dA + \int_A (\epsilon_1 \sigma \theta_{s1}^4 + \epsilon_2 \sigma \theta_{s2}^4) N^a j_s dA$$
$$- \left[\sum_{b=1}^{n} \int_A \int_{-1}^{+1} (k_{11} \frac{\partial N^a}{\partial x_1} \frac{\partial N^b}{\partial x_1} + k_{22} \frac{\partial N^a}{\partial x_2} \frac{\partial N^b}{\partial x_2}) j \theta^b d\zeta\, dA + \int_A (\epsilon_1 + \epsilon_2) \sigma \theta^4 N^a j_s dA + \right.$$
$$\left. \int_A \int_{-1}^{+1} \frac{\rho c}{\Delta\tau} (\theta - \theta^{(n,0)}) N^a N^b j d\zeta\, dA \right]^{(n,i)} \quad (10)$$

여기서 j는 체적적분을 위한 jacobian이고 j_s는 표면적분을 위한 jacobian이다.

4. 열변형 해석을 위한 유한요소법의 수식화

선형탄성의 재료에 열변형이 있는 경우에 응력과 변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\sigma = D\ (\epsilon - \epsilon^{th}) \quad (11)$$

여기서 ϵ^{th}는 열 변형률이다.

열변형 해석에서 구하고자 하는 것은 변위이므로 변형률과 변위에 대한 관계식이 필요로하다. 이 관계를 표현하는 것이 B 행렬인데 여기에는 전체좌표계(global coordinates)와 국부좌표계(local coordinates) 사이의 좌표변환과 회전에대한 좌표변환이 포함되어 있다. [2]

$$\epsilon = B\ u \quad (12)$$

여기서 $u = \{u_1, u_2, u_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3\}$

평형방정식으로부터 유한요소 수식화를 하여 B와 D 행렬로 표현을 하면 최종적으로 식 (13)의 결과를 얻을 수 있다.

$$\sum_{b=1}^{n} \int_A \int_{-1}^{+1} B^a D\, B^b j d\zeta\, dA u^b = \sum_{\beta=1}^{v} \int_A \int_{-1}^{+1} B^a D \epsilon^{th} j d\zeta\, dA \quad (13)$$

Ⅴ. 21″ FST 쉐도우마스크의 해석결과

예제로 사용된 쉐도우마스크는 21″ T.V.에 사용되는 것으로 Al-Killed 강을 쉐도우마스크의 재료로 사용하고 있고 바이메탈방식의 보정을 하고있다. 쉐도우마스크의 표면은 2단 곡률식으로 표현이 되고 일반강의 프레임과는 구석 4곳과 옆면 4곳의 8곳에서 점용접이 되어 있다. 지지강선의 모양은 쉐도우마스크 어셈블에 끼워진 상태를 입력하였고 흑화시킨 상태의 쉐도우마스크와 프레임의 방출율(emissivity)은 0.6과 0.5으로 하였다. 표 2에는 Al-Killed 강과 프래임의 재료상수가 주어져있고 그림 6에 해석에 사용된 쉐도우마스크의 개략도가 있다. 5, 10, 20, 30, 60 분 상태를 해석하였는데 그림 7부터 그림 9까지 온도분포결과가 있고 그림 10에서 그림 12 까지는 변형된 모습을 100배 확대하여 그려보았다. 그림 13부터 그림 17까지는 화면에서의 빔의 오착에 대한 그림이 나타나 있고 그림 18에는 시간에 따른 M.R.(Middle-Right) 위치에서 빔의 오착이 주어져 있다.

표 1. 주변온도

Table 1. Surrounding temperature.

Time (min.)		5	10	20	30	60
주변온도	앞면	25.0	27.0	30.0	32.0	34.0
	뒷면	26.0	29.0	33.0	36.0	38.0

표 2. 재료상수

Table 2. Meterial properties.

	Al-Killed	Frame
Young modulus(N/mm^2)	2.2×10^5	2.0×10^5
Poisson's ratio	0.25	0.28
Density(kg/mm^3)	7.85×10^{-6}	7.86×10^{-6}
Specific heat(J/kg°C)	475.0	470.0
Conductivity(W/mm°C)	5.45×10^{-2}	4.3×10^{-2}
Coefficient of thermal expansion	1.15×10^{-5}	1.2×10^{-5}

해석결과 초기에는 쉐도우마스크의 온도가 프레임(frame)의 온도보다 급격히 올라가는데 쉐도우마스크의 두께가 얇고 직접적인 열입력이 있기 때문이다. 처음에는 프레임이 열팽창하기전에 쉐도우마스크의 열팽창이 크므로 전체적으로 부풀어 오르는 모양이 되고 시간이 흐를 수록 프레임의 열팽창이 커져서 쉐도우마스크를 잡아 당기게 된다. 부분적으로 직접적인 열전달이 있고 용접점을 통해서 열이 들어오는 프레임은 온도가 서서히 올라갔다. 60분 정도가 지나면

열입력과 열복사가 평형을 이루어 거의 안정화상태(steady state)가 되고 온도가 가장높게 올라가는 곳은 쉐도우마스크 중심에서 조금 벗어난 곳이다. 바이메탈 방식의 보정에서 지지강쇠의 형상 때문에 프레임이 열팽창을 하여 지지강쇠를 밀게 되면 쉐도우마스크 전체가 회전하는 현상과 바이메탈 스프링의 온도가 올라가면 바이메탈이 굽게 되고 이로 인해서 지지강쇠가 회전을 하면서 쉐도우마스크를 화면방향으로 밀어 올리는 현상이 관찰되었다.

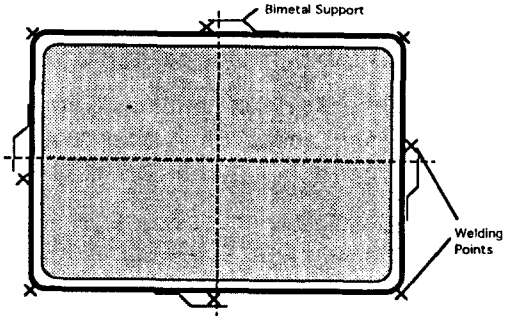

그림 6. 21″ 쉐도우마스크의 평면도
Fig. 6. Plane figure of 21″ FST shadow mask.

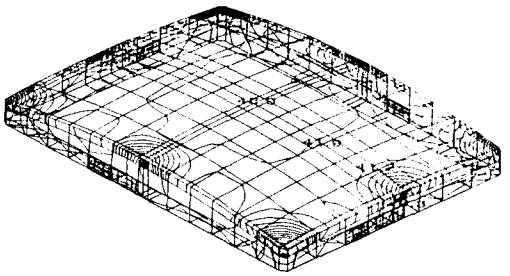

그림 7. 5분 후의 온도분포
Fig. 7. Temperature distribution after 5 minutes.

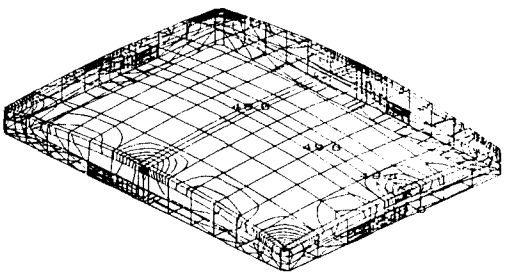

그림 8. 30분 후의 온도분포
Fig. 8. Temperature distribution after 30 minutes.

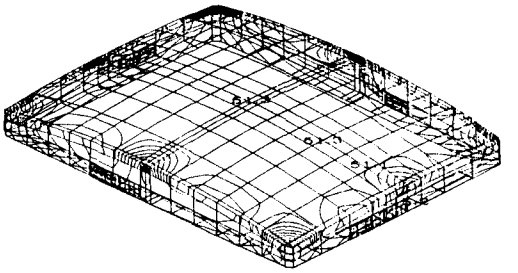

그림 9. 60분 후의 온도분포
Fig. 9. Temperature distribution after 60 minutes.

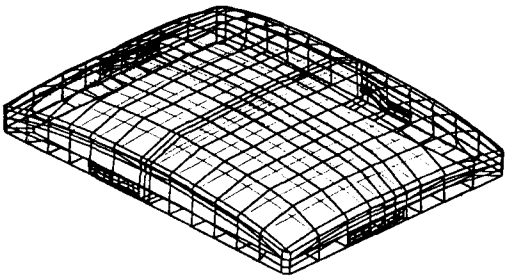

그림 10. 5분 후의 변형모습(100배)
Fig. 10. Deformation after 5 min. (x100).

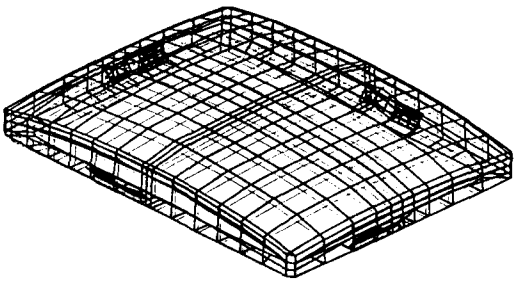

그림 11. 30분 후의 변형모습(100배)
Fig. 11. Deformation after 30 min. (x100).

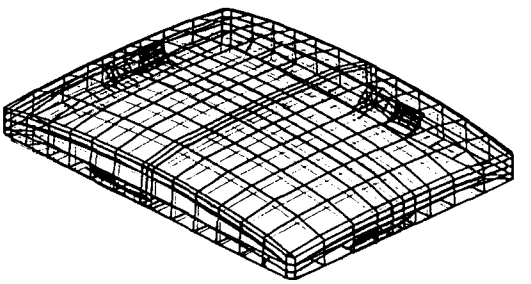

그림 12. 60분 후의 변형모습(100배)
Fig. 12. Deformation after 60 min. (x100).

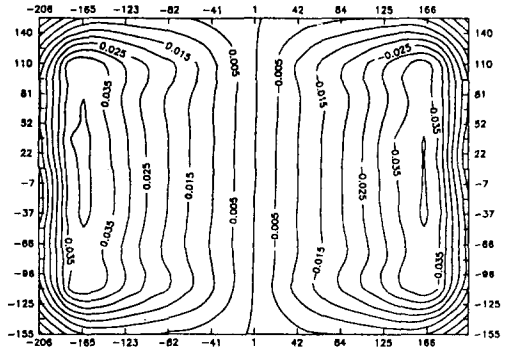

그림 13. 5분 후의 Beam Landing Shift
Fig. 13. Beam Landing Shift after 5 min.

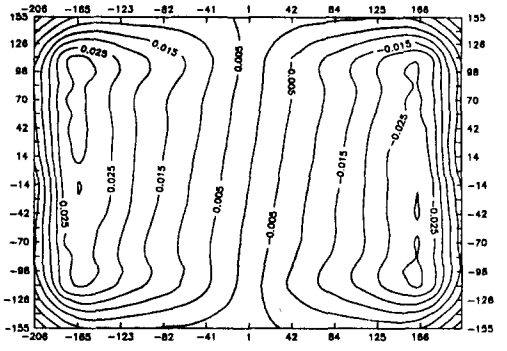

그림 14. 10분 후의 Beam Landing Shift
Fig. 14. Beam Landing Shift after 10 min.

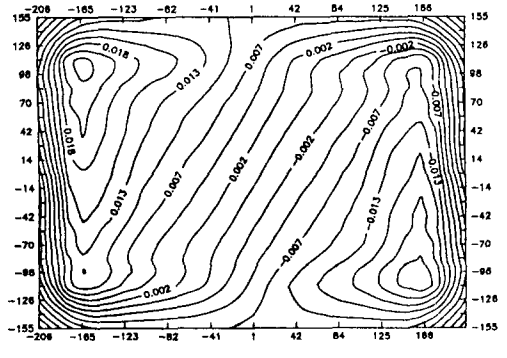

그림 15. 20분 후의 Beam Landing Shift
Fig. 15. Beam Landing Shift after 20 min.

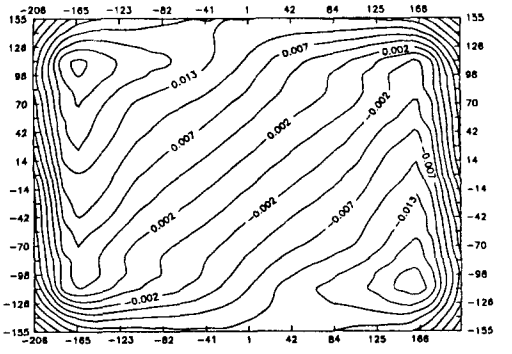

그림 16. 30분 후의 Beam Landing Shift
Fig. 16. Beam Landing Shift after 30 min.

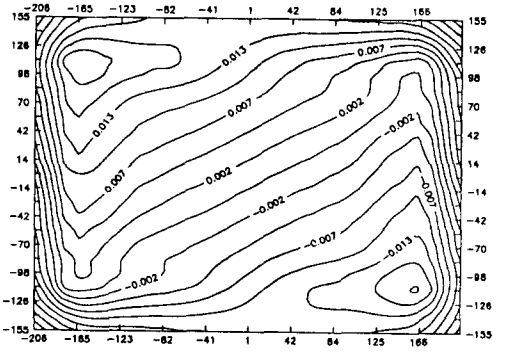

그림 17. 60분 후의 Beam Landing Shift
Fig. 17. Beam Landing Shift after 60 min.

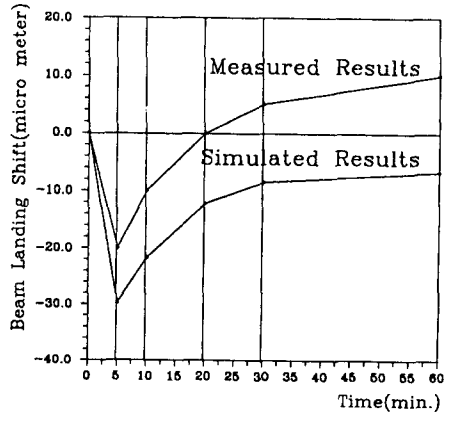

그림 18. 시간에 따른 MR 위치(x=123mm, y=0mm)의 Beam Landing Shift.
Fig. 18. Beam Landing Shift at MR position(x=123mm, y=0mm).

Ⅵ. 결 론

마스크의 유효열전달계수와 유효탄성계수를 계산하여 구멍이 없는 비등방성 쉘로 모델할 수 있었고 복사로 인한 비선형 지배방정식은 축차에 의해서 해를 구했다. 두께 방향으로 구멍의 모양이 변하는 것을 고려하기 위하여 쉐도우마스크를 재료성질이 다른 몇개의 층으로 가정하였다. 이와같은 과정을 통해서 쉐도우마스크의 열변형을 해석하고 이 결과를 이용하여 전자빔의 오착을 계산할 수 있었다.

21″ FST 쉐도우마스크의 온도해석 결과 초기에는 두께가 얇은 쉐도우마스크 부의 온도가 급격히 올라가고 직접적인 열입력이 적고 두께가 두꺼운 프레임은 온도가 서서히 올라 가므로 전체적으로 부풀어 오르는 결과가 나왔다. 60분 정도에서 안정화 상태(steady state)가 되었고 이 때에는 쉐도우마스크 전체가 비슷한 온도를 보였는데 프레임이 열팽창 하면서 쉐도우마스크를 잡아 당기는 결과가 나왔다. 열변형의 보정은 돌기(stud)를 중심으로 지지강쇠(support spring)가 회전하여 쉐도우마스크 전체를 화면방향으로 보내서 화면의 바깥쪽으로 이동되는 전자빔을 화면의 안쪽으로 바꾸게 된다. 바이메탈 지지방식에서는 지지강쇠의 형상 때문에 약간의 회전현상이 발생하였고 전반적인 열변형 모습과 전자빔의 이동량은 예상한 결과와 일치하였다.

參 考 文 獻

[1] Hidetoshi Yamazaki and Yasuhisa Ohtake, ″ Discoloration-Free Invar Mask Color Picture Tubes ,″ TOSHIBA REVIEW NO. 156 SUMMER, pp. 27 ~ 32, 1986.

[2] Thomas J.R. Hughes, ″ The Finite Element Method ,″ Prentice-Hall, pp. 383 ~ 417, 1987.

[3] Bathe, ″ Finite Element Procedures in Engineering Analysis ,″ Prentice-Hall, pp. 407 ~ pp. 418, 1982.

[4] E.Hinton and D.R.J. Owen , ″ Finite Element Software for Plates and Shells ,″ Pineridge Press Limitted, pp. 235 ~ 364, 1984.

[5] David F. Rogers and J. Alan Adams, ″ Mathematical Elements for Compute Graphics ,″ McGraw- Hill Book Company, pp. 176 ~ 180, 1976.

[6] 김현규,천현태,신동기,임세영, ″ 쉐도우마스크의 열변형 해석(온도분포) ,″ 대한기계학회논문집 제 17권 제 10 호, pp. 2574 ~ 2581, 1993.

著 者 紹 介

金 炫 圭(學生會員)

1968年生. 1990年 서울대학교 조선공학과 졸업. 1993年 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1993年 ~ 현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정 재학중.

朴 英 鎬(正會員)

1961年生. 1983年 영남대학교 금속공학과 졸업. 1985年 영남대학교 대학원 금속공학과 졸업(석사). 현재 오리온전기 종합연구소 선임연구원.

著者紹介

金 相 基(正會員)
1953年生. 1987年 경북산업대학교 기계공학과 졸업. 현재 오리온전기 종합연구소 선임연구원.

林 世 榮(正會員)
1953年生. 1976年 서울대학교 기계공학과 졸업. 1978年 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1985年 Illinoise 주립대학(brbana-Champaign)에서 박사학위 취득. 1987年 ~ 현재 한국과학기술원 기계공학과 부교수.