

평판디스플레이용 진공패널에서 유리판이 받는 응력 및 변위분포에 관한 연구

김희수 · 조영래 · 문제도 · 오재열 · 정태은* · 정효수

고등기술연구원 전자재료연구실

*자동차기술연구실

Study on the Stress and Displacement Distribution in the Glass Plate for Vacuum-sealed Flat Panel Displays

H.S. Kim, Y.R. Cho, J.D. Mun, J.Y. Oh, T.E. Chung* and H.S. Jeong

Electronic materials Lab.,

*Automotive technology Lab., Institute for Advanced Engineering, Yongin P.O. Box 25, Kyonggi-Do, 449-020

(1998년 5월 25일 받음, 1998년 10월 22일 최종수정본 받음)

초 록 평판디스플레이용 진공패널의 제작시 진공으로 유지된 패널을 구성하는 유리판이 받는 응력과 변위를 계산하였다. 유리판의 두께, 패널의 크기 및 실링폭의 크기를 변수로 하여 실제로 진공패널을 제작한 후 패널의 파괴양상과 변위를 측정하였다. 유리판의 파괴양상과 변형측정을 통하여 유리판에 걸리는 최대응력은 테두리부분에 걸리는 것을 확인하였다. 제작된 진공패널이 갖는 응력분포 및 변위의 분포는 패널을 진공실링할 때 사용한 실린트의 폭에 크게 의존하였다. 패널의 실링폭이 커질수록 모서리가 완전 고정된 조건으로 계산한 결과와 유사하였다. 두께가 3mm인 유리판을 사용해서 80×120mm² 크기의 패널을 제작할 때 실링폭이 20mm인 경우 측정된 변위는 57 μ m였으며, 이 값은 모서리가 완전히 고정된 조건으로 계산한 값인 54 μ m와 비슷하였다.

Abstract For vacuum sealed panel, stresses and displacements in the glass plate were calculated. The geometric variables for our experiment were the thickness of glass plate, the size of panel and the width of sealing line. The fracture behaviors and displacements of its under the vacuum were measured. From the measurement of strains and fracture, it was considered that the maximum stress acted at the middle of the sides of the panel. The stresses and displacement distribution of manufactured panels were greatly dependent on the width of the sealing line in the panel. The measured values are more similar to the values which were calculated from the condition of built-in edge as the width of the sealing line is larger. The measured displacement of the panel, made of 3mm thick glass plate, with size of 80×120mm² and 20mm sealing line was 57 μ m. This value is similar to calculated value, 54 μ m, from built-in edge condition in the finite element method.

1. 서 론

최근 정보의 중요성은 날이 커지고 있으며 정보의 양과 질에 있어서도 과거와 비교하여 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 정보표시 소자로 널리 사용되고 있는 CRT (Cathode Ray Tube)의 경우 화면 크기가 커지면서 모니터의 두께도 커지게 되어, 얇고 경량화된 평판디스플레이 (Flat Panel Display, FPD)의 개발을 요구하게 되었다. 현재 개발되었거나 개발이 진행중인 평판디스플레이에는 LCD (Liquid Crystal Display), ELD (Electroluminescent Display), VFD (Vacuum Fluorescent Display), PDP (Plasma Display Panel), FED (Field Emission Display) 등이 있다. 이 가운데 VFD와 FED는^{1,2)} 진공소자로서 다른 정보표시 소자와는 달리 높은 수준의 진공패키징 기술을 필요로 한다. 평판디스플레이용 진공패널의 제작에 있어서 스페이서는 매우 중요하며, 그 역할은 두 유리판 사이의 간격을 일정하게 유지시키고 스페이서가 없는 경우 발생할 수 있는

유리판의 굽힘 및 파괴를 막아주는 것이다.³⁾ 즉, 진공패키징 시 스페이서가 없는 경우 진공패널 내외부의 압력 차이에 의한 휨응력 (bending stress)을 받으므로 유리판 자체가 휘어지고 경우에 따라서는 유리에 균열이 생겨 파괴가 일어나게 된다. 이러한 휨응력을 줄이기 위해서 진공패키징 시 유리 패널의 내부에 일정한 간격을 두고 스페이서를 설치한다. 그러나 패널의 크기가 작은 경우는 스페이서를 설치하지 않고도 진공패널을 제작할 수 있다. 유리판의 휨과 파괴의 관계는 유리판의 두께 및 패널의 크기와 함수 관계를 갖게 되므로 주어진 패널의 크기에 대하여 적정두께의 유리판을 사용하여야 유리판의 파괴를 야기하지 않고 진공패키징이 가능하게 된다. 본 연구에서는 두 장의 유리판을 사용하여 진공패키징할 때 스페이서를 사용하지 않고 사용할 수 있는 소다유리 (soda-lime glass)의 조건을 알아보고, 또한 특정한 두께를 갖는 유리판에 대하여 각각의 유리판에 걸리는 응력과 패널의 중앙에서 변위를 계산하여 실제 파괴양상과 비교하였다.

2. 이 론

그림 1은 본 연구에서 사용된 진공패널의 구조를 간략하게 도시한 것이다. 진공패널의 내부는 고진공상태이고, 외부는 대기압상태이기 때문에 패널을 구성하는 유리판 자체가 표면에 수직한 방향으로 패널 내부와 외부의 압력차이에 의한 힘을 받게된다. 따라서 유리판은 패널의 내부방향으로 휘어지게 되며, 이와 같은 휨은 유리판에 응력을 생기게 한다. 유리판 내부의 응력 특히 인장응력이 유리의 파괴강도 이상이 되는 경우 유리판에 균열을 생성시켜 결국 유리판을 파괴시킬 수 있다. 유리판의 중앙을 원점으로 취하는 좌표계를 설정한 경우 유리판이 받는 최대 벤딩모멘트(bending moment, M)는 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.⁴⁾

$$M = Kqa^2 \tag{1}$$

여기서 K는 경계조건 인자, q는 압력, a는 유리판의 폭을 나타낸다. 식 (1)에서 벤딩모멘트를 구할 수 있고, 이로부터 유리판의 표면부분에 걸리는 최대응력을 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma_{max} = \frac{6M}{t^2} \tag{2}$$

여기서 t는 유리판의 두께이다. 그런데 식 (1)에서 벤딩모멘트는 패널의 제작시 유리판 모서리의 경계조건에 따라 값이 달라진다. 즉 유리판이 휘어질 때 판상의 모서리 조건은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 단순지지(simply supported)된 경우이고, 두번째는 완전고정(built-in edge)된 경우이다. 단순지지의 경우는 유리판이 휘어질 때 모서리 부분에서 회전이 가능하지만 길이방향으로 판이 움직일 수 없는 경우이고, 완전고정의 경우는 모서리 부분에서 회전이 불가능함은 물론이고 길이방향으로 판의 움직임도 없는 경우이다. 단순지지와 완전고정의 각 경우에 대한 경계조건은 다음과 같다.

i) 단순지지(simply supported edge) :

$$w=0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \tag{3}$$

ii) 완전고정(built-in edge) :

$$w=0, \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

위에서 w는 유리판의 두께 방향으로 변위(displacement)이다. 표 1은 정방형 판재의 경우 최대 휨응력(max. bending stress)과 중앙에서의 변위값을 나타낸 것이다. 표 1에서 a와 b는 유리판의 폭과 길이이며(b≥a), t는 유리판의

두께이다. E와 ν는 각각 유리판의 영률(Young's modulus)와 poisson's ratio이다. M은 압력 q가 진공패널에 작용할 때 생기는 벤딩모멘트이다. 각 조건에 대하여 응력상태 및 중앙에서의 변위를 비교해 보면 최대 휨응력과 중앙에서의 변위가 경계조건에 따라 그 절대값과 위치가 달라진다. 단순지지의 경우 유리판의 중앙에서 최대 벤딩모멘트를 가지는 반면, 완전고정의 경우는 가장자리부분의 중앙에서 최대 벤딩모멘트를 갖는다. 각 조건에 있어서 식 (2)로부터 구한 최대 인장응력이 유리판의 표면부분에 작용하면 균열이 발생, 성장하여 유리를 파괴시킬 수 있다. 각 경계조건에 따른 최대변위는 완전고정과 단순지지의 경우 둘다 유리판의 중앙에서 최대변위가 생기지만 단순지지의 경우가 완전고정의 경우보다 큰 변위를 가지게 된다.

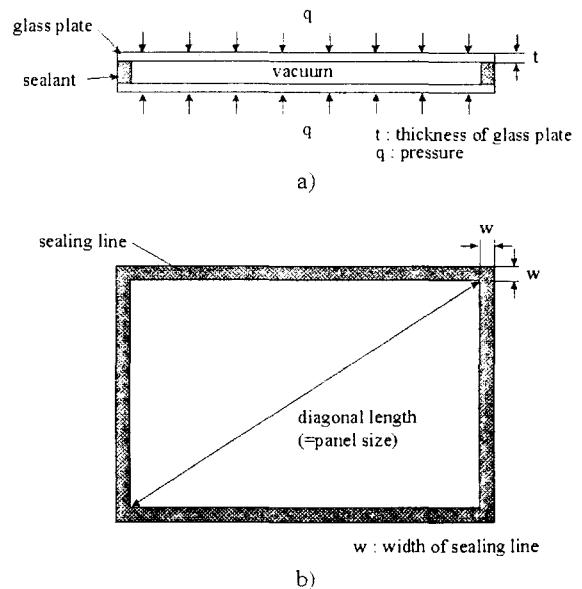


Fig. 1. Geometric configuration of vacuum-sealed flat panel display ; a) side view, b) tip view.

3. 실험 방법

진공패널 내부와 외부의 압력차이로 인해 유리판에 생기는 응력상태를 조사하기 위하여 실제로 두 가지 종류의 크기를 갖는 패널을 제작하였다. 사용한 유리판은 두께가 2mm와 3mm인 소다유리였으며, 패널의 크기는 3.7인치(50×80mm²)와 5.7인치(80×120mm²)로 제작하였다. 두 유리판 사이의 간격은 스크린프린팅(screen printing) 방법으로 프릿유리(frit glass)를 도포하고 지름이 500μm인 유리볼

Table 1. Max. bending moment and max. displacement at the center of the glass panel in two boundary conditions.⁴⁾

b/a(=1.5)	(w) _{x=0, y=0}	(M _x) _{x=a/2, y=0}	(M _y) _{x=0, y=b/2}	(M _x) _{x=0, y=0}	(M _y) _{x=0, y=0}
Simply supported	0.00772qa ⁴ /D*	0	0	0.0812qa ²	0.0498qa ²
Built-in edge	0.00220qa ⁴ /D	-0.0757qa ²	-0.0570qa ²	0.0368qa ²	0.0203qa ²

*D = $\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$

(glass sphere)을 넣어서 조절하였다. 프리트유리를 유리판의 테두리 부분에 도포해서 두 장의 유리를 마주보게 정렬시킨 후 450℃에서 1시간 동안 열처리하여 실링된 패널을 제작하였다. 프리트유리는 납유리 계통으로 소다유리와 열팽창계수가 거의 비슷하기 때문에 실링 후 유리판에 생기는 잔류응력의 영향은 무시할 수 있다. 실링공정이 끝난 패널은 진공펌프를 사용해서 진공도가 10^{-4} torr 정도로 되도록 배기하였다. 패널의 배기시 패널 내·외부에 압력차이가 생김에 따라 패널을 구성하는 유리판은 응력을 받아 변형이 되며, 패널의 크기와 유리판의 두께에 따라 일부분의 패널에서 파괴가 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 진공펌프와 연결된 패널의 배기구를 최종 실링함으로써 고진공을 갖는 패널을 제작하였다. 이런 방법으로 제작한 패널은 내부의 진공도가 10^{-4} torr대로 유지되었으며, 진공패널 내·외부의 압력차이로 인해 생긴 유리판의 변위를 surface profiler (Tencor 社, P10)를 사용해서 측정하였다. 또한 유리판에 걸리는 응력상태를 알아보기 위하여 패널의 가운데 부분과 프리트유리에 인접한 안쪽 테두리부분에 스트레인 게이지(strain gage)를 설치하여 패널을 진공으로 배기하면서 변위상태 및 스트레인 값의 변화를 살펴보았다. 유리판의 중앙에서의 변위에 미치는 실링폭의 영향을 조사하기 위하여 두께가 3mm인 유리판을 사용해서 $80 \times 120\text{mm}^2$ 크기의 패널을 제작하였다. 이 때 실링폭의 두께를 5mm, 13mm 및 20mm로 변화시켰으며 각 경우에 대하여 진공실링 후 유리판 중앙에서의 변위를 측정하였다. 완전고정된 조건에서 유한요소법(Finite Element Method, FEM)으로 응력분포 및 중앙에서의 변위를 계산하여 실제로 제조한 패널의 응력상태 및 변위와 비교하였다. 사용한 프로그램은 ANSYS이며 초기에 메시(mesh)를 6×4 , 12×8 , 24×16 , 48×32 , 96×64 개로 나누어서 실시하였으며, 응력 및 변위가 수렴하는 메시의 조건인 96×64 개로 결정하여 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유리에 걸리는 응력상태 및 파괴양상

표 2는 두께가 2mm와 3mm인 유리판을 사용하여 패널을 제작한 경우의 유리판의 파괴양상을 요약해서 나타낸 것이다. 크기가 $50 \times 80\text{mm}^2$ 인 패널의 경우 유리판의 두께가 3mm인 것은 물론이고, 두께가 2mm인 경우도 파괴가 일어나지 않았다. 반면 $80 \times 120\text{mm}^2$ 패널의 경우는 두께가 2mm인 유리판을 사용하여 패널을 제작하였을 때 7개의 시편 중에서

4개의 시편에서 파괴가 생겼다. 파괴가 생긴 4개의 시편 중에서 2개는 프리트유리 부분에서 파괴가 발생하였고, 나머지 2개는 프리트유리로 된 실링체의 안쪽 20mm 부분에서 실링체와 나란한 방향으로 파괴가 일어났다. 유리판에 파괴가 일어나지 않은 경우는 유리판의 양쪽이 각각 $250\mu\text{m}$ 이상 휘어져서 패널의 중심부에서 두장의 유리판이 서로 접촉하였다. $80 \times 120\text{mm}^2$ 패널의 제작시 두께가 3mm인 유리판을 사용한 경우는 프리트유리 부분에서 일부 파괴가 일어났으나 유리판 자체에서는 파괴가 일어나지는 않았다.

두께가 2mm와 3mm인 유리판을 사용하여 패널을 제작해서 진공으로 배기할 때 유리판의 파괴양상은 크게 두 가지로 다르게 나타났다. 첫번째 경우는 실링체인 프리트유리 부분에서의 파괴이고, 두번째 경우는 유리판 자체에서의 파괴였다. 유리판 자체의 파괴는 프리트유리 테두리에서 2mm 정도 안쪽에서 균열이 발생하고 테두리방향을 따라 전파되어 파괴가 일어났다. 실링체인 프리트유리 부분에서 생기는 파괴양상은 열처리시 프리트유리의 불균일한 소성이 일어난 부분에 응력집중이 발생하여 일어난 현상으로 보인다. 그런데 유리의 파괴에 필요한 인장강도는 $40 \sim 100\text{MPa}$ 인데 비해서 프리트유리의 파괴를 위한 인장강도는 $100 \sim 400\text{MPa}$ 로 비교적 크다.⁵⁾ 따라서 프리트유리의 열처리 중에 불균일한 소성이 되는 경우는 진공배기시 프리트유리 부분에 응력의 집중이 생겨서 작은 인장응력에서도 균열이 발생할 수 있다.

두번째 경우인 패널의 내부에서 실링체를 따라 나란히 생기는 파괴양상은 진공패키징된 패널에서 유리판에 걸리는 응력상태와 응력분포를 통하여 설명하고자 하였다. 표 3은 진공패키징한 패널의 중앙과 가장자리 부분에 스트레인 게이지를 부착하여 배기시 유리판의 변형의 방향을 측정할 값과 표 1에 나타난 식을 이용하여 이론적으로 계산한 결과를 요약해서 나타낸 것이다. 패널의 가운데 부분은 압축응력을 받고, 실링체에 인접한 테두리 부분은 인장응력을 받고 있음을 보여준다. 표 1에서 알 수 있듯이, 유리판이 휘어질 때 경계조건이 단순지지일 경우는 유리판의 윗면이 전체적으로 압축응력을 받게 되고, 완전고정의 경우는 전체적인

Table 2. Fracture behavior of glass plate after evacuation.

Panel size	$50 \times 80\text{mm}^2$		$80 \times 120\text{mm}^2$	
	2mm	3mm	2mm	3mm
Thickness of glass	2mm	3mm	2mm	3mm
Fracture behavior	○	○	△	○

*○ : No fracture, △ : Some of specimens were fractured.

Table 3. Measured and calculated strains in the glass plate for evacuated panel. Panel size is $80 \times 120\text{mm}^2$ and thickness of glass is 2mm.

Position	Measured strain	Calculated strain	
		Built-in edge	Simply supported
Edge	3.66×10^{-4}	5.77×10^{-4}	0
Center	-1.36×10^{-4}	-2.81×10^{-4}	-6.19×10^{-4}

* '+' : tensile, '-' : compressive.

힘에 의해 변형될 때 유리판의 윗면 중 테두리 부분에서는 인장응력을 받게 되고 중앙으로 갈수록 응력상태는 인장에서 압축응력 상태로 변화하게 된다. 이러한 결과로부터 본 연구에서처럼 진공패키징한 패널의 유리판이 받는 응력상태는 모서리의 경계조건이 완전고정인 경우와 비슷함을 알 수 있다.

본 시스템의 경우 표 1에서 보여진 Timoshenko 등이 정리한 계수를 적용하여 휨응력을 계산할 수 있으며, 이와 같이 계산된 휨응력은 유리판의 표면에서 받고 있는 최대응력 값이다. 최대응력이 유리의 파괴강도 (일반적인 소다유리의 파괴 강도 값은 50MPa 정도임)⁶⁾ 이상인 경우 유리판의 표면에서 균열이 발생하고 전파되어 유리판의 파괴가 일어나게 된다. 그림 2는 80×120mm² 크기의 패널에 있어서 완전고정 조건으로 계산한 유리판의 두께변화에 따른 최대 휨응력과 최대변위를 나타내었다. 두께가 2mm인 유리판을 사용한 경우 패널 각 부분에서의 응력계산 결과를 그림 3에 나타내었다. 여기에서 계산된 응력은 유리판에 걸리는 유효 응력 즉 Von Mises stress이다. 유리판의 두께가 커질수록 유리판의 변위는 급격히 줄어들며 최대응력 또한 줄어들게

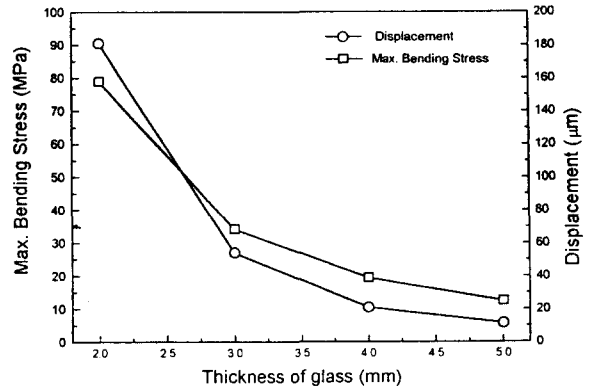


Fig. 2. Theoretical calculation of the maximum bending stress and the displacement of the glass after evacuation. Boundary condition of calculation is built-in edge and panel size is 80 × 120mm².

된다. 본 연구에서 측정된 유리판의 응력분포는 모서리가 완전히 고정된 경우보다는 작지만, 표 3의 스트레인 값에서 보여진 바와 같이 유리판에 걸리는 응력상태는 모서리가 완

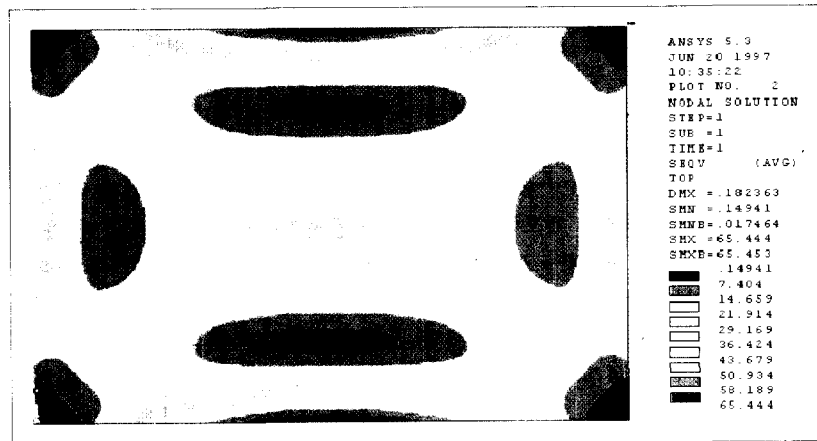


Fig. 3. FEM result of stress distribution in glass after evacuation. The size of glass plate is 80 × 120 × 2mm³ and calculated stress is Von Mises stress.

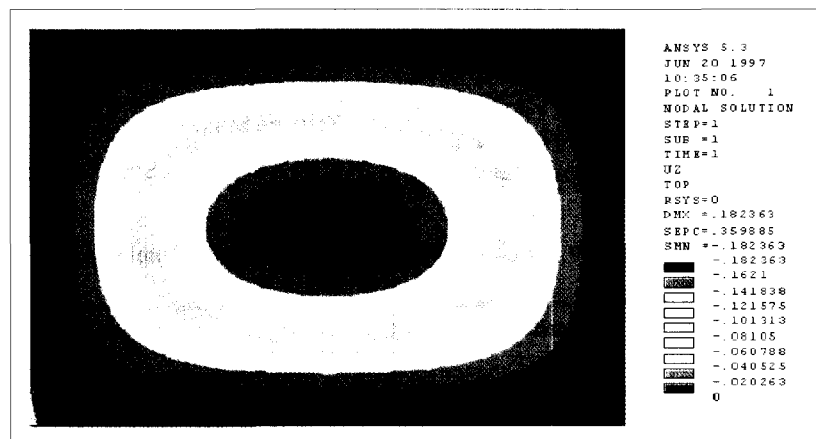


Fig. 4. FEM result of displacement of glass after evacuation. The size of glass plate is 80 × 120 × 2mm³.

Table 4. Measured displacement at the center of the glass having different thickness.

Panel size	50 × 80mm ²		80 × 120mm ²	
Thickness of glass (mm)	2	3	2	3
Displacement at the center (μm)	27.8	11.8	contact	102.0

Table 5. Effect of width fo sealing line on the displacement at the center of glass panel. Panel size is 80 × 120mm² and thickness of glass is 3mm.

Line width (mm)	Measure			Calculation	
	5	13	20	Built-in edge	Simply supported
Deflection (μm)	102	72	57	54	189

전히 고정된 상태의 응력과 유사한 값을 가진다. 그림 2에서 보듯이 유리관의 두께가 2mm인 경우는 완전고정의 조건에서 유리관이 받는 최대 휨응력은 79MPa 정도이다. 이렇게 큰 휨응력은 80 × 120mm² 크기의 패널제작 시 두께가 2mm인 유리관을 사용한 경우 패널의 파괴를 유발하게 된다. 두께가 2mm인 유리관을 사용한 일부의 시편에서 파괴가 일어나지 않은 이유는 유리관의 파손이 생기기 전에 패널의 중앙부분이 서로 접촉되어서 테두리 근처의 응력상태가 변하거나 테두리 부분에서의 탄성에 의한 응력변화가 생겼기 때문이라고 생각된다. 그림 3에서 보여진 바와 같이 유리관에 걸리는 최대응력은 테두리 부분에 생기며, 실제 관찰된 유리관의 파괴양상에 있어서도 테두리 부분의 프릿유리 안쪽을 따라 균열이 전파되었음을 알 수 있었다.

유리관의 파괴양상과 이론적으로 구한 유리의 응력값을 비교해 보면 유리관에 걸리는 응력은 모든 모서리가 완전히 고정된 상태인 완전고정(built-in edge)에 가깝다고 생각된다. 그러나 실제의 경우 비록 경계조건이 완전고정에 가깝기는 하나 어느 정도의 변위가 프릿유리 주위에서 발생할 것이다. 즉 각 모서리가 완전고정인 조건이 아니라 테두리 부분에서 프릿유리의 탄성변형에 의하여 내부응력은 계산값보다 작을 것으로 생각되며, 따라서 그림 3의 유한요소법으로 계산된 값들은 유리관에 작용하는 최대응력으로 볼 수 있다.

4.2 유리기관의 중앙부분에서의 변위

그림 2에서 패널을 구성하는 유리관의 두께가 변화할 때 유리기관 중앙부분의 변위도 크게 변화하는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 80 × 120mm² 크기의 패널제작시 두께가 2mm인 유리관을 사용할 때 패널의 각 부분에서의 변위를 유한요소법으로 계산한 결과를 나타내었다. 표 4는 실제로 패널을 제작해서 유리관의 중앙에서 변위를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 계산 값인 그림 4와 측정값인 표 4를 비교해 볼 때 본 시스템의 경우인 실험적으로 측정된 변위는 각 모서리가 완전고정인 조건으로 구한 변위보다 더 큰 값을 갖는다. 두께가 2mm인 유리관을 사용해서 크기가 80 × 120mm²인 패널을 제작할 때 완전고정의 조건으로 계산한 경우는 중앙에서의 변위가 182μm이지만, 실제로 측정된 경우는 변위가 250μm 이상으로 상하부 기관이 서로 접촉되었다.

표 5는 두께가 3mm인 유리관을 사용하여 제작한 진공패널에서 실링폭의 변화에 따른 유리관의 최대변위와 이론적으로 계산된 변위를 나타낸 것이다. 실링폭이 커질수록 최대변위가 작아지는 것을 볼 수 있으며, 실링폭이 5mm, 13mm, 20mm로 커질수록 최대변위는 102μm, 72μm, 57μm로 작아졌다. 유한요소법으로 계산되는 최대변위는 진공패널의 모서리조건에 따라 달라지며, 모서리조건이 단순지지된 경우 계산값이 189μm이고, 완전고정된 경우는 54μm로 단순지지된 경우보다 작은 변위를 나타내게 된다. 표 5에서 실링폭이 커질수록 측정된 최대변위의 크기는 완전고정된 조건으로 계산한 변위에 근접하게 됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 실링폭이 커질수록 실링제 부분에서 유리관의 변형 및 회전이 제한되기 때문으로 생각된다. 그러나 실제로 평판디스플레이용 진공패널을 제작해 사용하기 위해서는 유리관의 변위가 엄격하게 수 μm 혹은 수십 μm 이내로 제한되어 있다. 따라서 스페이서를 사용하지 않고 80 × 120mm² 크기의 진공패널을 제작할 때는 유리관의 두께가 3mm 이상인 것을 사용하여 변위를 더욱 줄일 필요가 있다.

5. 결 론

평판디스플레이용 진공패널을 제작할 때 패널을 구성하는 유리관이 받는 응력과 변위에 대한 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 진공패널을 제작할 때 패널크기와 유리관의 두께에 따라서 파괴양상은 달라졌으며, 유리관의 파괴양상과 변형 측정을 통하여 유리관에 걸리는 최대응력은 테두리부분에 걸리는 것을 확인하였다.
- 2) 실험적으로 측정된 진공패널의 유리관이 받는 응력과 변위는 실링폭의 크기에 따라 크게 변하였으며, 진공패널의 제작시 사용한 실린트의 실링폭이 커질수록 패널의 모서리가 완전고정된 조건을 적용해서 유한요소법으로 계산한 응력과 변위 값들과 유사하였다.
- 3) 진공패널의 실링폭이 커질수록 실링제부분에서의 유리관의 변형 및 회전이 제한되기 때문에 최대변위가 작아지고, 패널 모서리의 경계조건이 단순지지된 조건에서 완전고정인 조건으로 근접하여 가는 것으로 판단하였다.

감사의 글

본 연구 수행의 일부는 정보통신부 과제 지원에 의해 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

1. L.E. Tannas, Jr., *Flat-panel displays and CRTs*, Van nostrand reinhold company, New York (1985), P188
2. I. Brodie and P.R. Schwoebel, Proceedings of the IEEE, **82**, 1006 (1994)
3. S.M. Jacobsen, J. SID, **4**, 331 (1997)
4. S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*, 2nd Ed., McGraw-Hill Company (1959), Chap. 6
5. Jan Havac, *The technology of glass and ceramics*, Elsevier Science Publishing Corp., Amsterdam (1983), P228
6. N.E. Dowling, *Mechanical behavior of materials*, Prentice Hall, New Jersey (1993), P80