

CRT 글래스 벌브의 탄소성 접촉 응력 해석

강대진 *, 신운서 **, 송창섭 ***

Elastic-plastic Contact Stress Analysis of CRT Glass Bulb

Dae Jin Kang *, Woon Seo Shin **, Chang Seop Song ***

ABSTRACT

In this paper, we discuss the cathode ray tube(CRT) glass bulb stress and sagging recovery by the contact band pressure using finite element method. We analyzed the band pressure and stress using contact element method between band and bulb before and after banding process which was conducted to decrease the stress concentration using finite element method, and calculated sagging recovery. The analysis results were confirmed by experiments using strain gauge and sagging recovery test apparatus.

Key Words: CRT(음극선관), Finite element method(유한요소법), Elastic-plastic contact stress(탄소성 접촉응력), Sagging recovery(회복률)

1. 서론

칼라 벌브는 텔레비전용 CPT(Color picture tube)에서 컴퓨터 모니터용인 CDT(Color display tube)에 이르기까지 다양하게 사용되고 있으며, 특히 멀티미디어의 확산에 따라 보다 큰 화면 및 평면화면^(1,2)을 요구하고 있고, 사용중 외부 충격에 의한 유리 파손을 방지하기 위해 설계시에 완성벌브의 유리응력을 특정값 이하로 규제하여 그 이하의 외부충격이 가해질 때 유리 벌브가 파손되지 않도록 하거나 특정 값이상 유리벌브에 가해져도 전면부로 튀어나오는 파편이 최소화 되도록 하고 있다. 이 때문에 취성재료인 유리 벌브의 충격에 대한 신뢰성 확보가 중요한 문제로 대두되었다. 이를 해결하기 위해 패널(Panel) 주변 부에 밴드를 조여주어 유리 벌브 내에 발

생하는 최대인장응력을 감소시키게 된다. 본 연구에서는 진공 배기로 인한 유리 벌브의 응력분포와 그 때의 최대 주응력 및 응력집중을 저감시키기 위해 실시하는 패널(Panel) 부위의 밴드 보강공정후의 유리 벌브 응력재분포 및 밴드 응력분포를 해석하는 데 목적이 있으며, 응력과 회복율을 측정하여 본 해석의 신뢰성을 검증하였다.

지금까지의 연구에서는 밴드를 별도로 모델링하지 않은 것이 일반적이었다.이중에 Choi 등⁽³⁾, 神吉康文, 菅原恒彦⁽⁴⁾은 패널(Panel) 상 밴드접촉 예상부위에 밴드 작용력을 균일하게 등가화하는 방식으로 해석하여 이를 검증하였으므로 밴드 형상변화에 따른 유리 벌브상의 회복률 및 주응력변화를 파악할 수 없는 문제점이 있다. Cha 등⁽⁵⁾은 계산 속도와 정확도를 향상시키기 위해 BEM(Boundary element method)를 사용하였다. 또한 Aoki⁽⁶⁾는 본 연구와

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과 (정회원)
 ** LG전자 멀티미디어연구소
 *** 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과 (정회원)

같이 접촉 요소(Contact element)를 써서 유리 벌브상의 주응력변화를 해석하였으나 각 인자들이 회복률에 미치는 영향을 별도로 분석하지 않았다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 밴드를 실제 형상대로 모델링하고 패널(Panel)과의 사이에 열수축 공정에 의해서 발생하는 거동을 접촉 요소(Contact element)를 사용하여 비선형적으로 해석한 뒤 회복률과 응력을 측정하여 잘 일치함을 확인하였다.

따라서 기존에는 밴드에 의한 접촉압력분포를 균일분포 하중으로 가정하였으므로^(9,4), 밴드 인자들에 의한 영향을 분석할 수 없었던 문제점들을 본 연구결과에 의해 해결할 수 있었다. 또 해석결과를 바탕으로 각종 요소들의 민감도를 분석하였다.

2. 이론적 해석

2.1 이론적 배경

본 해석의 대상을 간략하게 도시하면 Fig. 1과 같다. 본 연구에서 유리 벌브와 밴드사이의 접촉 거동을 해석하기 위해 사용한 접촉 요소(Contact element)는 Fig. 2와 같이 5개의 절점으로 구성되며 목표면은 목표 절점 I, J, K, L로, 접촉면은 접촉 절점 M으로 구성된다.⁽⁷⁾ 접촉은 I, J, K, L로 구성된 목표면을 절점 M이 뚫고 지날 때 이루어지며, 이는 M과 I, J, K, L로 구성된 면사이의 거리인 간격의 크기로 판통여부를 알 수 있다. 여기서 I, J, K, L로 구성된 면에 수직한 방향으로 힘이 생기며, 이 수직력은 아래 식(1)과 같다. 여기서, K_n 은 접촉 강성(Contact stiffness)이고 g 는 간격이다.

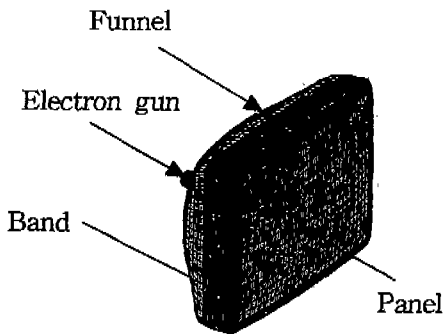


Fig.1 Total assembly

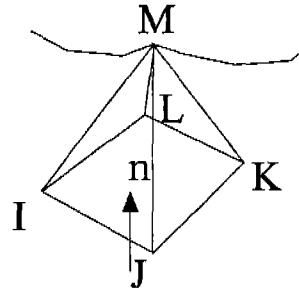


Fig.2 Target surface and node

$$\begin{aligned}
 f_n &= K_n g \quad \text{if } g \leq 0 \\
 f_n &= 0 \quad \text{if } g > 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

2.2 모델링

본 해석에 적용된 모델은 25" 칼라 텔레비전용 음극선관이다. 모델링은 전체 음극선관 형상이 x, y 축에 대칭이므로 계산시간 및 기억용량을 절약하기 위하여 1/4형상만 모델링하였다. 본 연구에서 사용한 S/W로 유리 벌브 모델링은 자체 개발한 모델러를 이용하여 진공배기 경계조건만 부과하였고, 밴드는 역시 자체개발한 밴드 전용 모델러를 이용하였다. 솔버로는 ANSYS (V5.1)을 사용하였으며, 해석시 간략화를 위해 밴드의 용접편 및 밴드시 테이프는 생략하였다. 사용한 좌표계는 직각좌표계이며 이때 장축방향이 X축, 단축방향이 Y축, 패널(Panel)에서 전자총쪽 방향이 +Z축이다. (Fig. 1참조) 요소(Element)로서는 유리 벌브와 밴드는 3D 8-절점 solid element이고 접촉면은 3D 5-절점 접촉 요소(Contact element)를 사용했다. Table 1에 사용한 ANSYS 요소 타입과 요소갯수를 보였다.

Table 1 Element type and element no.

	Element type	Element no.
Panel	SOLID 45	1180
Funnel	SOLID 45	840
Band	SOLID 45	385
Contact element	CONTAC 49	910
Total		3315

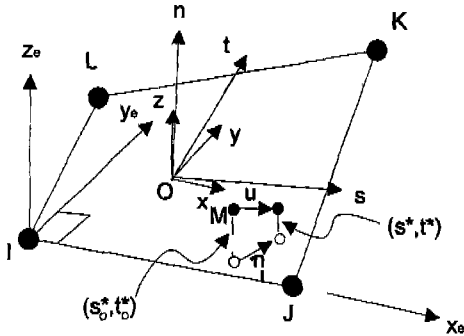


Fig. 3 Contact node position on the target pane

해석 조건

비선형 정적 구조해석으로서, 우선 유리 벌브 표면에 진공배기로 인한 대기압을 작용시키고 밴드의 열 수축 공정조건을 적용하기위해 상온에서 고온으로 올려 열팽창시킨 상태로 두고 다시 상온으로 냉각시키며 밴드 체결시 유리 벌브와 밴드 사이의 접촉을 밴드의 소성변형(Plastic deformation)을 고려하여 접촉 요소(Contact element)를 적용하여 계산하면 밴드와 유리 벌브 사이의 압력이 계산된다.

경계조건

유리 벌브의 경우 대칭구조의 절단면은 대칭 경계조건으로, 전자총부 끝단면은 Z 방향 변위를 구속하고 유리 벌브 표면은 대기압을 적용하며, 밴드의 경우 대칭구조의 절단면은 역시 대칭 경계조건으로 밴드의 하단부 절점은 Z 방향 변위를 구속하고, 밴드 전체 절점에는 밴드 열하중 이력(History)을 적용하여 상온에서 고온으로 다시 상온으로 냉각시켰다.

해석 과정

해석 과정은 아래와 같다.

첫째, 밴드를 상온에서 고온으로 가열한다. 이를 위해, 팽창된 상온시의 밴드를 모델링하고 유한요소를 생성한 후 변위 경계조건 및 열하중을 부여한다. 이때 밴드의 열팽창을 계산하고 계산된 절점좌표와 변위정보를 이용하여 팽창된 형상의 밴드 유한요소를 생성한다. 둘째, 고온에서 상온으로 냉각되며 벌브를 조여주는 과정으로서, 우선 유리 벌브를 모델링하고 유한요소를 생성한 뒤 대기압을 부여한다. 다음, 밴드와 벌브 사이에 접촉이 예상되는 면에 접촉 요소(Contact element)를 생성하고, 밴드의

변위 경계조건 및 열하중을 부여하며 소성 물성치를 입력한 후 풀이과정으로 들어간다.

2.3 해석 결과

접촉 요소(Contact element)기법을 이용하여 해석한 결과, 최대 주응력은 진공시 장축(Long axis)변은 74.0 Kg/cm² 단축(Short axis)변은 76.4 Kg/cm², 밴드시 장축변은 34.1 Kg/cm² 단축변은 43.9 Kg/cm²로 나타났다.(Fig.1 참조) 이것을 Fig. 4에 진공시 유리 벌브 응력분포, Fig. 5에 밴드시 유리 벌브 응력분포로 나타내었다. 유리 벌브의 응력 분포가 밴드공정후에 패널(Panel) 전면에 걸쳐 전체적으로 응력이 분산되어 있는 것을 알 수 있으며, 최대 주응력이 걸리는 패널(Panel)전면 가장자리 부위의 응력이 많이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 밴드의 등가 소성응력분포는 코너 부위에 집중적으로 크게 분포함을 알 수 있다.

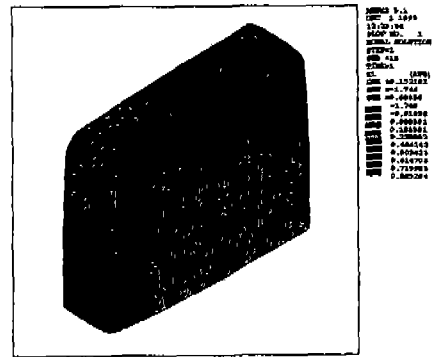


Fig.4 Max. principal stress distribution of glass bulb exterior surface at vacuum condition

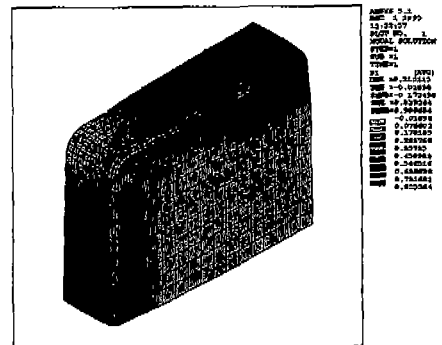


Fig.5 Max. principal stress distribution of glass bulb exterior surface at banding condition

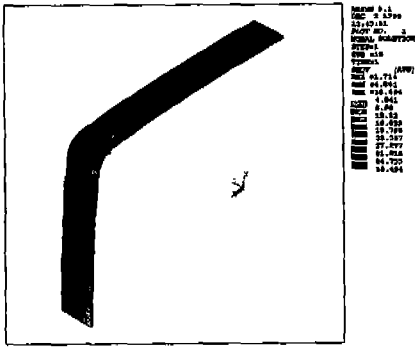


Fig. 6 Max. principal stress distribution of band surface at banding condition

Fig. 6에 밴드시 밴드내 응력 분포를 보였고, Fig. 7에는 진공시 변위와 Fig. 8에는 밴드시 변위를 보였다. 진공에 의해 끌려 들어간 패널(Panel) 중앙부위가 밴드가 패널(Panel)을 조여줌에 의해 상당히 회복된 것을 볼 수 있다. 퍼널(Funnel)부위 변형도 줄어든 것을 알 수 있으며, Fig. 9에는 진공시 최대 주응력과 Fig. 10에는 밴드시 최대 주응력을 보였다. 가는 선으로 표시된 것이 최대 주응력인 데 굵은 선부위로 부터 수직한 거리가 최대 주응력 크기이다. 밸브 바깥 쪽이 인장응력이고 안쪽이 압축응력이다. 유리의 경우 압축응력에는 강하나 인장응력에 취약하므로 최대 주응력만 분석하였으며, 유리 내부에도 물론 인장응력이 걸리나 외부에는 충격등에 파손의 우려가 크므로 외부의 인장응력만이 문제가 된다. Fig. 10에서와 같이 밴드로 보강한 경우 장축, 단축 코너부위의 최대 주응력이 밴드에 의해 상당히 줄어든 것을 알 수 있다. 회복률은 64.2%로서 오차율은 2%에 불과했다.

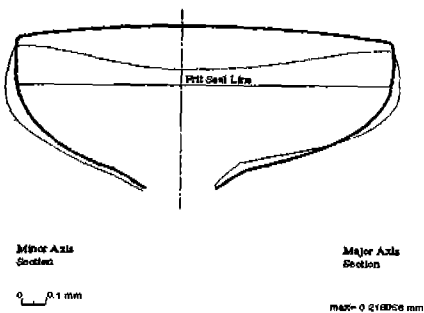


Fig. 7 Displacement of glass bulb at vacuum condition

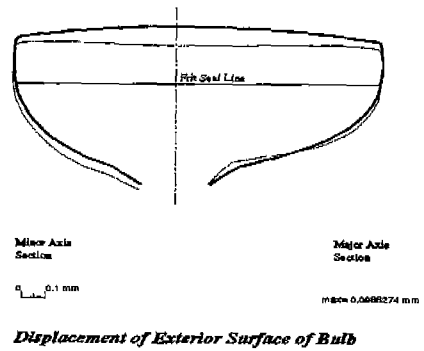


Fig. 8 Displacement of glass bulb at banding condition

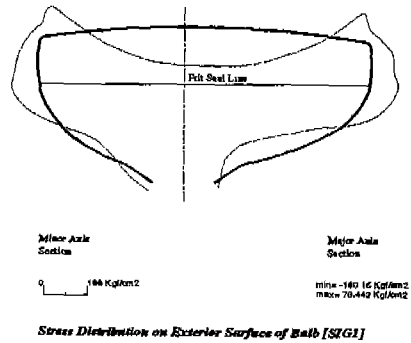


Fig. 9 Max. principal stress of glass bulb exterior surface at vacuum condition

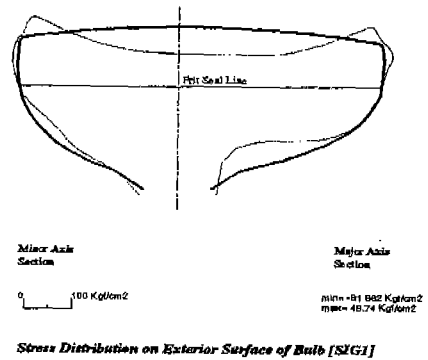


Fig. 10 Max. principal stress of glass bulb exterior surface at banding condition

3. 실험 및 고찰

3.1 최대 주응력 측정 실험

계산된 유리 밸브의 응력분포를 실제제품과 비교, 검증하기 위하여 아래 Fig. 11와 같은 위치에 45°로 세트 스

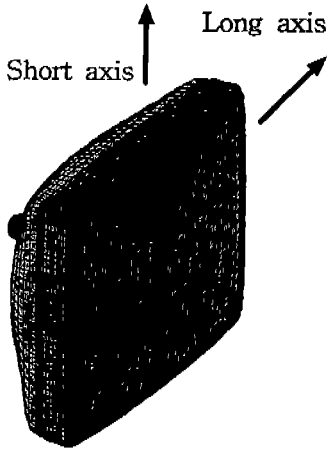


Fig. 11 Strain gauge position

Table 2 Comparison of max. principal stress at vacuum & banding condition

State Results		unit : [Kg/cm ²]			
		Vacuum		Banding	
		① Long axis	② Short axis	① Long axis	② Short axis
Test results	# 1	61.5	62.2	31.5	39.1
	# 2	62.0	58.0	27.0	36.0
	# 3	70.0	68.8	32.0	39.6
	# 4	69.0	68.3	34.1	40.9
	# 5	66.5	64.4	28.7	35.2
	# 6	69.2	70.1	31.4	38.1
	Avg.	66.4	65.3	30.4	38.2
	Standard deviation	3.8	4.7	2.9	2.2
Analysis results		74.0	76.4	34.1	43.9
Error [%]		10.3	14.5	10.7	13.1

트레인 게이지를 사용하여 유리 벌브의 최대 주응력을 측정하였고, Table 2에 해석 결과와 비교하였다. 6회의 실험결과 진공시 장축변 최대 주응력 평균은 66.4 Kg/cm², 표준편차는 3.8, 단축변 평균은 65.3 Kg/cm², 표준편차는 4.7, 밴드시 장축변 최대 주응력 평균은 30.4 Kg/cm², 표준편차는 2.9, 단축변 평균은 38.2 Kg/cm², 표준편차는 2.2로 나타났다. 최대 주응력의 경우, 본 해석 결과와 실험 결과사이에 약 10.3 ~ 14.5 [%]의 오차가 있다. 이는 본 해석이 비선형해석이며 또한 밴드의 형상 및 여러 가지의 단순화 과정을 포함하고 있고, 실험 또한 유리 벌브의 표면에 스트레인 게이지를 붙여서 응력을 측정할 때 발생하는 오차로 판단된다. 따라서 본 접촉 요소(Contact element)를 이용한 유리 벌브응력해석이 정확하게 응력을 예측한다고 할 수 있다.

3.2 회복률 측정 실험

본 해석 결과를 비교, 검증하기 위한 또 하나의 방법으로서 회복률 측정이 있다. 이 방법은 위의 응력측정 방법보다 어렵지 않으면서도 쉽게 유리 벌브의 응력상태를 추정할 수 있다는 강점이 있다. 유리 벌브 완제품은 진공으로 인해 패널(Panel)면이 내측으로 약간 들어가 있고 밴드에 의해 다시 약간 나온 상태이다. 이 때 진공 상태로 인해 들어간 양으로 밴드에 의해 회복되어 나온 양을 나누어 준 값이 회복률이며, 벌브의 변형 모습은 Fig. 12와 같다. 실험 방법은 아래와 같다. 우선 Fig. 13과 같이 회복률 측정지그를 패널(Panel) 표면에 올린 후 센터를 맞춘다.

① 밴드를 자르고 다이알 게이지의 변화값을 읽는다.

(측정량 A)

② 진공을 해제하고 다이알 게이지의 변화값을 읽는다.

(측정량 B)

측정되는 회복률은 $A/B \times 100$ [%] 가 된다.

회복률의 경우, 본 해석의 결과는 Table 3과 같으며, 실험결과와 약 2.0% 정도의 오차를 보이고 있으며 응력 해석결과보다 더 실제와 잘 맞음을 알 수 있다. 이로 볼 때 응력 변화보다 오차가 크지 않음을 알 수 있다. 회복률이 주응력보다 값의 변화가 크므로 모델개발시 설계변수 변화에 따른 응력변화 효과를 평가할 때 회복률 측정이 오히려 더 민감한 요소임을 알 수 있다.

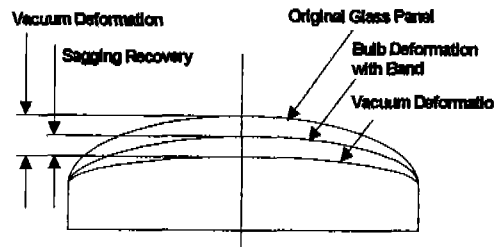


Fig. 12 Bulb deformation

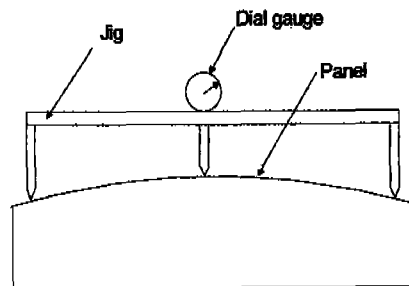


Fig. 13 Sagging recovery test method

Table 3 Comparison of sagging recovery

		Sagging recovery [%]
Test data	# 1	64.5
	# 2	65.7
	# 3	66.5
	Avg.	65.6
	Standard deviation	1.0
Analysis result		64.2
Error [%]		2.0

3.3 고찰

해석 결과에 대하여 각종 변수를 제작 가능한 설계 범위 내에서 변화시켜 가며 최대 주응력 민감도를 살펴본 결과, 아래 Table 4, Table 5, Table 6 및 Table 7과 같다. 여기서 A, B, C, D, E는 Table 4의 인자 및 수준이고, 민감도는 Fig. 14와 같으며, 그래프의 기울기가 심할수록 최대 주응력에 민감하게 영향을 준다. 결과로는 첫째, 변수 변화시 응력 변화율 보다 회복률 변화율이 더 크다. 둘째, 최대 주응력 변화에 가장 크게 영향을 주는 요소는 내주장 변화이다.(Fig. 14참조) 이는 본 연구에서 해석한 인자 수준내에서 약 79% 민감도를 가졌다. 셋째, 겹침 부위 폭이 6.4%, 재질 두께 5.0%의 순으로 민감도를 보였다.

다음, 회복률을 분석해 보면 Table 6, Table 7과 같다.

결과, Fig. 15와 같이 회복률이 가장 크게 영향을 주는 요인은 밴드 내주장(E)이고 내주장이 적어질수록 회복률이 커진다. 다음으로 밴드 겹침폭부위(A)이며 겹침폭부

위(A)가 클수록 회복률이 커진다. 밴드 일자형 폭부위와 조립위치, 밴드 두께는 그다지 영향을 주지 않았다. 일반적으로 밴드 조립위치는 패널(Panel)쪽으로 갈수록 회복률이 커지나 본 민감도 분석에서는 조립 위치를 현재보다 3mm정도 패널(Panel)쪽으로 움직인 경우를 봤을 때 큰 영향이 없었다. Table 7에 인자별 기여도를 보였다.

Table 4 Factors and levels

Source	Level			Remark	
	Level 1	Level 2	Level 3		
A	Width of double part	-5mm	present value	+5mm	
B	Width of single part	-5mm	present value	+5mm	
C	Position	present value	+3mm		2 Level
D	Band thickness	present value	+0.4mm		2 Level
E	Inner length	-3mm	present value	+3mm	

Table 5 Mean analysis of max. principal stress

Source	D.F.	Sum of squares	V.	P.C. %
A	2	210.6	105.3	6.4
B	2	59.6	29.8	1.8
CD	2	164.0	82.0	5.0
C	1	(1.4)	(1.4)	0.05
D	1	(135.3)	(135.3)	4.95
E	2	2589.3	1294.7	78.8
N	1	232.6	232.6	7.1
e	8	28.6	3.6	0.9
Total	17	3284.7	193.2	100

* D.F.: Degree of Freedom, V. : Variances
P.C.: Percent Contribution

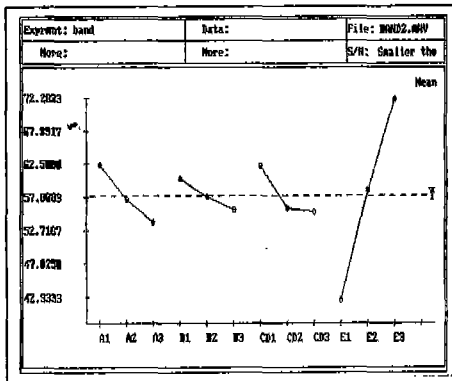


Fig. 14 Sensitivity analysis graph of max. principal stress

Table 6 Sagging recovery at factor combination

		unit : %				
		N (Sagging recovery)				
A	B	CD	E			
1	1	1	1	30.4		
2	1	2	2	26.0		
3	1	3	3	10.8		
4	2	1	2	9.0		
5	2	2	3	65.6		
6	2	3	1	33.4		
7	3	1	3	41.3		
8	3	2	1	10.9		
9	3	3	2	78.6		

(CD)
(CD)₁ C₁D₁
(CD)₂ C₂D₂
(CD)₃ C₁D₂

S/N=10log(Mean/Standard Deviation)²

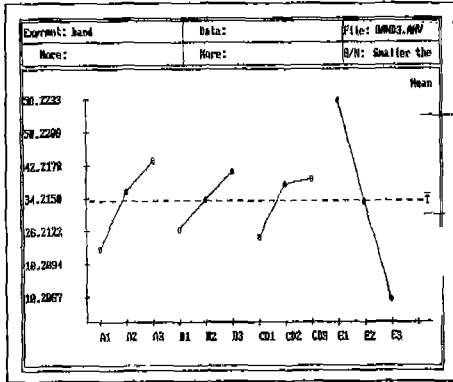


Fig. 15 Sensitivity analysis graph of sagging recovery

Table 7 Percent contribution unit : %

Source	Sum of squares	Percent contribution %
A Width of double part	1380.8	6.4
B Width of single part	592.4	1.8
CD Assembling position / Thickness	745.0	5.0
E Inner length	6918.4	78.8
N Noise of long & short axis	9.8E-13	7.1
e Error	-2.4E-11	0.9
Total	9636.4	100

4. 결론

기존에는 밴드에 의한 영향을 분석하기 위해 유리 표면에 등가화하여 응력을 가하였으나, 본 연구에서는 밴드를 모델링하고 실제 공정과 같은 조건으로 밴드접촉형태, 압력 및 응력 저감효과를 해석하였고 해석치를 회복률 측정치와 비교한 결과, 정확히 일치함을 확인하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 적용한 Multi-linear kinematic hardening rule을 이용한 탄소성해석이 종래의 균일 분포 하중방식으로 해석한 결과보다 더욱 정확하였다.

2) 종래 밴드 형상을 모델링 하지 않고 유리 벌브 응력 및 회복률을 해석함으로써 정확히 예측할수 없었던 유리 벌브 응력저감용 밴드형상에 대한 주응력 및 회복률을 접촉요소(Contact element)를 사용하여 밴드의 접촉형태, 압력 및 응력 저감효과등을 정확히 예측할 수 있다.

3) 회복률이 최대 주응력보다 변수 변화시 더 민감하게

변화한다.

4) 최대 주응력 및 회복률에 가장 크게 영향을 주는 요인으로는 밴드 내주장 변화의 영향이고, 내주장이 현재보다 짧을수록 회복률이 커지며, 최대주응력은 작아진다.

5) 밴드 조립위치는 최대주응력에는 패널(Panel)쪽으로 갈수록 크게 응력을 줄이는 인자이나 회복률면에서는 큰 영향이 없다.

6) 접침부위폭 요인은 최대주응력변화영향은 적었으나 회복률면에서는 현재보다 폭이 넓을수록 회복률이 커진다.

7) 재질 두께요인은 최대 주응력 및 회복률에 미치는 영향이 미미하다.

참고문헌

1. F.R. Ragland, Jr., R.J. D'Amato and R.H. Godfrey, "Development of the square-planar color picture tube", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. CE-30, No.4, November, pp.550-555, 1984.
2. A. Imamura, T. Ikoma, H. Makio, K. Kikuchi, "New design trend of large CRT bulbs", SID '92 Digest, pp.501-504, 1992.
3. J.H. Choi, C.H. Kim, and K.H. Kim, "Stress analysis of safety band in glass bulb design" Proc. Japan-Korea joint symp. Information Display '92, IDY92-147, pp.73-77, 1992.
4. 神吉康文, 菅原恒彦, "Analysis of stress in vacuum glass bulb by finite element method and its applications to the designing process", 旭硝子研究報告 34 (2), pp.141-162, 1984.
5. C.Y. Cha, S. Vaidyanathan, A. Adamski, W. Bozek, & J. Trevelyan "A comparison of techniques for the elastic stress analysis of a cathode ray tube", Computational mechanics, Inc.; Billerica, Massachusetts, U.S.A.
6. T. Aoki, "A finite element analysis of Trinitron glass bulb compressed with heat-shrink band", SID '93 Digest, pp.213-215, 1993.
7. P. Kohnke, "ANSYS User's manual for Revision 5.0, Vol. IV, Theory", pp.196-204, 1992.