

평면 음극선관의 재생률 향상을 위한 유리재료의 열적 특성에 관한 연구

박상후* · 이부윤[†] · 김원진* · 허보석**
(2001년 2월 14일 접수, 2001년 9월 28일 심사완료)

A Study on the Thermal Properties of Glass for Effective Salvage Process of Flat Cathode-ray Tube

Sang-Hu Park, Boo-Youn Lee, Won-Jin Kim and Bo-Suk Huh

Key Words : Flat Cathode-ray Tube(평면 음극선관), Frit Glass(프리트 유리), Salvage Process(재생과정), Frit Sealing Process(소성공정), Thermal Expansion Coefficient(열팽창 계수), Recycling Ratio(재생률)

Abstract

The CRT(Cathode-ray Tube) of salvage is a process of separating the panel and funnel to recycle a cathode-ray tube. In this paper, the thermal properties of glass for CRT were studied to improve its recycling ratio. In the salvage process, several patterns of breakage, as called 'corner pull', were easily generated on the sealing surface of panel or funnel glass due to the residual tensile stress, which had correlations with some parameters of the manufacturing process of CRT and the initial material properties of glass. Finite element analyses and experimental approaches on the frit sealing process were carried out to obtain the major characteristic of glass related to the residual stress. From this study, it was identified that the thermal expansion coefficient of glass had much influence on the residual stress of panel glass after frit sealing process. Therefore, the optimal conditions of thermal properties for CRT glass were proposed to achieve an effective salvage process. By using these optimal conditions, the size of corner pull on the panel and funnel glass was reduced to 10% level compared with the original size, and the recycling ratio of CRT was increased in the salvage process.

1. 서론

최근 디스플레이 제품에 대한 소비자의 요구가 고해상도와 가장자리의 형상 왜곡이 없는 평면화된 제품으로 집중됨에 따라 기존 음극선관(cathode-ray tube)의 판넬(panel) 외면을 평면화 시켜서 만든 평면 음극선관이 개발되었다. 이러한 평면 음극선관의 기하학적 특징은 판넬의 외부면을 평면화함으로써 중앙부와 가장자리부의 두께차가 심하게 나타난 것이다. 이러한 두께차 비율을

웨치율(wedge ratio)이라고 하며, 기존 판넬의 경우에는 웨치율이 104% 정도이지만, 평면 음극선관의 경우에는 모델에 따라 다소 차이가 나지만 200%가 넘는 것이 일반적이다. 따라서 평면 음극선관의 경우에 판넬 외면형상의 평면화에 따른 화질이 개선되는 장점을 가진 반면에 웨치율이 크기 때문에 제작 공정상에서 온도 불균일에 의한 유리 파손이 자주 발생하게 된다. 그리고 기존 판넬에 비하여 무게가 무겁고, 제품 가격이 높은 단점도 가지고 있다.

Fig. 1 에는 평면 음극선관의 주요 부품형상과 식 (1)에는 웨치율의 관계식을 나타내었다.

$$\text{Wedge ratio}(\%) = \frac{\delta_a}{\delta_b} \times 100 \quad (1)$$

식 (1)에서 δ_a 와 δ_b 는 Fig. 1에서 나타낸 바와

[†] 책임저자, 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

E-mail : bylee@kmu.ac.kr

TEL : (053)580-5922 FAX : (053)580-5165

* 계명대학교, 기계자동차공학부

** LG 생산기술원

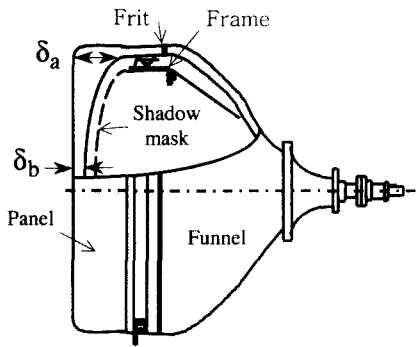


Fig. 1 Schematic diagram of the components of FCT

같이 판넬부의 가장자리와 중앙부의 두께를 의미한다. 현재까지의 평면 음극선관에 사용되는 판넬과 퍼넬(funnel)에 대한 대부분의 선행 연구^(1,2)는 제조공정 중에 발생하는 파손을 방지하기 위한 목적으로 진행되었고, 재생공정 자체에 대한 연구는 상당히 적은 편이다. 따라서 본 연구에서는 평면 음극선관의 재생률 향상을 위하여 재생공정 중에서 판넬과 퍼넬의 분리율에 영향을 주는 유리물성 인자에 관하여 연구하였고, 해석과 실험을 통하여 분리율 향상을 위한 유리재료의 선정기준을 제시하였다.

2. 현상 분석

2.1 재생공정 개요

평면 음극선관의 재료비 구성을 살펴보면 모델에 따라 다소 차이가 나지만, 판넬 및 퍼넬 유리의 재료비가 전체 재료비의 약 40~50% 정도 차지한다. 따라서 음극선관 제조업체에서는 유리파손 이외의 공정상 발생하는 미소한 결함을 가진 불량품에 대하여 판넬과 퍼넬을 분리하여 재활용하게 되는데, 이러한 공정을 재생공정(salvage process)이라고 하며, 공정의 순서⁽³⁾는 일반적으로 다음과 같다.

먼저, Fig. 1에 나타낸 판넬과 퍼넬의 접합부인 프리트(frit)가 유리보다 질산(nitric acid)에 의한 침식속도가 빠른 것을 이용하여 질산으로 에칭(etching)시켜서 초기 균열을 만든다. 그리고 온수(hot water)를 음극선관 전면에 균일한 온도분포가 될 때까지 분사시킨 후, 냉수(cold water)를 음극선관 외측에 다시 분사시키면 내,외면의 온도차에 의하여 외면에 일시적으로 수축에 의한 인장응력이 발생되어 초기 균열이 성장하게 된다. 이때 프리트 접합부 안쪽 내면은 힘의 평형을 이루기 위한 압축응력이 발생되어 균열이 더 이상 성장하지 못하게 되는데, 마지막 공정으로 온수를 다시 음극선관 외면에 분사하면 외면은 열팽창에 의하여 늘어나게 되고 안쪽 내면은 상대적으로 외면에

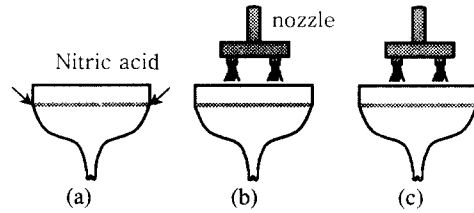


Fig. 2 Salvage processes; (a) etching process (b) hot water injection process, and (c) cold water injection process

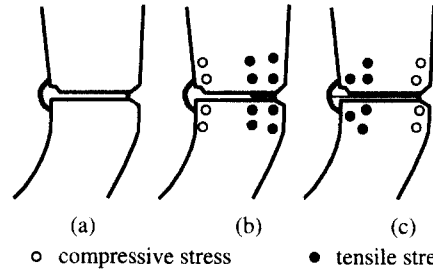


Fig. 3 Schematic diagram of stress direction at estimated points; (a) after etching, (b) after cold water injection, and (c) after hot water injection process

비하여 온도가 낮아져서 응력의 형태(pattern)가 이전 공정과는 반대로 되어 접합면의 내면에 인장응력이 발생하게 된다. 따라서 균열이 내면까지 성장하게 되어 최종적으로 판넬과 퍼넬의 분리된다.

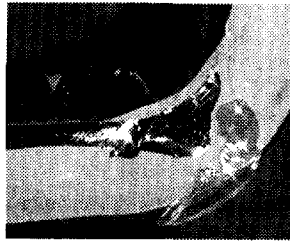
여기서 분리가 성공적으로 되기 위한 공정변수로는 냉온수의 분사노즐 위치, 온도차, 분사시간, 분사량, 분사위치 등이 있으며 이러한 변수들은 재생하는 음극선관의 크기와 모델에 따라 다소 차이가 난다.

Fig. 2에는 분리공정에 대한 개략적인 공정순서를 나타내었다. 그리고, Fig. 3에는 선행연구 사례⁽³⁾에서 측정된 각 공정순서에 대한 응력분포 변화를 나타내었다.

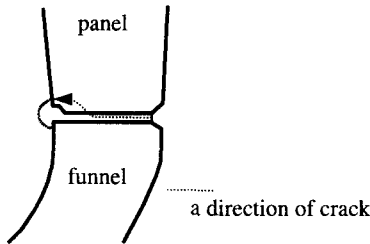
2.2 불량현상 분석

재생공정에서 발생하는 불량 유형을 살펴보면 몇 가지로 분류되는데 분사되는 물의 온도차 또는 부적절한 분사위치 등의 재생 공정상 잘못으로 발생하는 열 응력과 판넬 및 퍼넬의 제품 제조공정 중에 발생되어 내부에 존재하는 미소한 균열, 기공(void) 또는 불순물 등의 영향으로 재생 공정시에 응력집중이 발생하여 판넬의 전면부에 균열이 발생하는 현상(gross breakage)과 판넬의 모서리 부분이 파손이 되는 현상(corner breakage) 그리고 프리트 접합면에서 쪽 떨어짐 현상(corner pull) 등의 불량현상이 있다.

본 연구에서는 이러한 여러 가지 불량현상 중에서 가장 빈번하게 발생하고 판넬과 퍼넬의 접합



(a) Photography of corner pull



(b) Failure mechanism

Fig. 4 Mechanism of Corner pull failure

면에 존재하는 잔류응력의 영향으로 발생하는 프리트 접합면의 쪽 떨어짐 현상에 대하여 분석하였다. 쪽 떨어짐 현상은 음극선관의 생산공정에서 프리트 접합면에 과도하게 발생된 인장방향의 잔류응력이 재생 공정에서 프리트 접합부의 균열이 원하지 않는 방향인 판넬 또는 퍼넬 면으로 성장하여 발생하는 불량현상이다. 이러한 경우 분리된 판넬과 퍼넬은 재사용이 불가능하며, Fig.4 에는 이러한 쪽 떨어짐 현상의 대표적인 예와 파손 메커니즘을 간략하게 나타낸 것이다.

쪽 떨어짐의 불량현상에는 여러 가지 원인이 있으나, 앞서 기술한 바와 같이 음극선관의 제조공정 중에서 판넬과 퍼넬을 프리트로 접합시키는 소성로 공정(frit sealing process)에서 접합면의 내면에 과도하게 걸려있는 인장 잔류응력의 영향이 큰 것으로 판단되어지며, 이러한 잔류응력에 영향을 주는 인자는 판넬 및 퍼넬 유리의 열적 특성(thermal properties)인 것으로 분석된다.⁽³⁾

불량현상에 대한 원인을 실험적으로 분석하기 위하여 소성로 공정을 거친 음극선관에서 쪽 떨어짐 현상이 자주 발생하는 코너부의 프리트 접합부를 잘라서 유리 등의 투명한 재료에 빛의 편광을 이용하여 응력 성분을 분석하는 편광기(polariscope)를 이용하여 잔류응력을 측정해 본 결과 접합부의 판넬 내면에 인장응력이 많이 걸려있음을 알 수 있었다. 또한, 이러한 인장응력의 크기는 판넬과 퍼넬의 제조사에 따라 다르게 측정되었고, 쪽 떨어짐의 불량률이 많이 발생하는 판넬의 경우 소성로 공정 이후에 판넬의 내면 접합부에 인장응력이 상대적으로 매우 크게 나타났다.

Glass maker	Tensile stress (MPa)
A	20.9
B	13.2

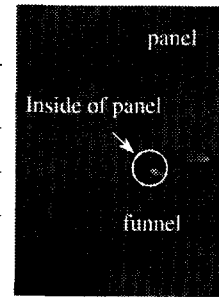


Fig. 5 Stress distributions on the inside of panel

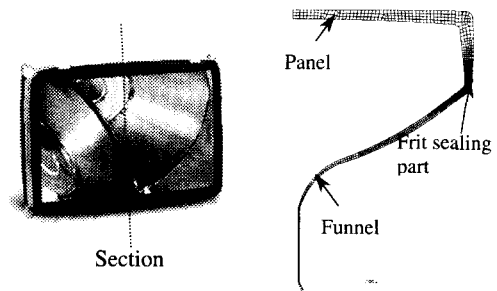


Fig. 6 Two dimensional finite element model

제조사별로 판넬과 퍼넬의 유리재료 물성이 다르며, 이러한 물성의 영향으로 소성로 공정이후에 접합부에 걸리는 잔류응력의 크기가 달라지게 되며, 인장 잔류응력이 상대적으로 크게 걸려있는 경우에는 재생공정에서 쪽 떨어짐이 많이 발생함을 실험적으로 알 수 있었다.

Fig. 5 에는 편광기로 측정된 잔류응력의 사진과 제조사별로 접합부 내면에서의 인장응력 크기를 나타낸 것이다.

3. 유한요소 해석

3.1 해석 모델 및 경계조건

실험을 통하여 재생율에 영향을 주는 인자가 프리트 접합부에 걸리는 잔류응력이며, 이것은 판넬 및 퍼넬의 열적 특성에 따라 영향을 많이 받는 것으로 분석되었다. 따라서 유한요소 해석을 통하여 소성로 공정을 분석하여 접합부에 걸리는 잔류응력의 크기와 유리의 물성 그리고 제조사별로 판넬과 퍼넬을 조합할 경우에 발생하는 잔류응력의 변화를 분석하였다.

유한요소 해석모델은 Fig. 6 과 같이 평면 변형률 조건(plane strain condition)으로 가정하기 위하여 음극선관 장축부의 2 차원 단면모델로 만들었으며, 프리트 접합부의 형상은 실제 소성로 공정을 거친 음극선관을 절단하여 동일한 형상으로 모델링하였다.

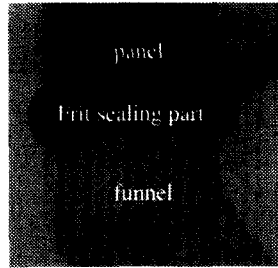


Fig. 7 General shape of frit sealing part

Table 1 Temperature conditions for frit sealing process

Zone	Range (°C)	A variation of temperature
Heating	25~410°C	7.4°C/min.
Softening	410~440°C	2.7°C/min.
Holding	at 440°C	25min.
Cooling-1	440~350°C	-4.1°C/min.
Cooling-2	350~25°C	-4.0°C/min.

Fig. 7 에는 해석에 사용된 프리트 접합부의 형상을 나타내었는데, 프리트의 조건에 따라 다소 형상의 차이는 실제로 존재하지만 해석상에서는 가장 일반적인 형상을 선택하여 모델링하였다.

소성로 공정에서 접합과정은 용매(vehicle)와 혼합되어 퍼넬의 접합면에 반원의 형상으로 건조된 프리트가 온도가 올라감에 따라 녹아 흐르면서 판넬과 퍼넬 사이에서 0.1~0.2mm 의 접합간격을 유지하게 되고, 나머지 프리트는 접합면의 내외면으로 밀려나가 타원형의 형상으로 된다. 그리고 440°C에서 약 25 분간 유지하면, 프리트와 혼합된 용매는 증발되고 판넬 및 퍼넬과 화학적 결합력을 가지면서 굳어지게 된다. 그러나 해석모델에서는 실제로 프리트의 건조에서 용융을 지나 응고되는 과정에서 유동현상까지 포함하여 묘사하기 어렵기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 7 과 같이 실험에서 구한 소성로 공정 이후의 프리트 결합부의 최종 형상을 모델링하여 해석하였다. 그리고 소성로 공정에서 특정시점이 지난 뒤에 프리트가 완전히 응고되기 때문에 응고시점 이전에는 프리트가 점성(viscosity)이 다소 높은 유체 상태(fluid state)로 존재하여 판넬과 퍼넬의 열변형에는 거의 영향을 주지 못한다. 따라서 해석상에서 응고가 되기 이전에는 판넬 및 퍼넬과 프리트간의 변형에 대한 상호작용을 배제하도록 프리트의 탄성계수를 응고이후의 1/10000 크기로 주고, 열팽창만 일어나도록 하였다. 그리고 응고시점 이후부터는 판넬과 퍼넬이 완전히 프리트에 의하여 접합되었다고 가정하여 프리트의 탄성계수를 정상적인 값으로 주어서 열변형시 상호작용이 발생하도록 경계조건을 만들었다.

Table 2 Thermal properties of panel and funnel glass

Maker	Coeff. of thermal expansion(1/°C)		Coeff. of thermal conductivity (W/m·K)	
	P	F	P	F
A	P	1.118e-05	P	0.981
	F	1.061e-05	F	0.920
B	P	1.094e-05	P	1.330
	F	1.087e-05	F	1.254

이러한 공학적 가정은 실제 현상과는 다소 차이가 나겠지만 유체유동을 구조역학적으로 고려하는 데는 큰 무리가 없음을 알 수 있었다. 해석은 상용 소프트웨어인 MSC/MARC⁽⁴⁾를 사용하였으며, 해석에 사용된 요소(element)는 평면 변형률 요소를 사용하였다. 그리고 소성공정 해석에 사용된 온도조건은 Table 1 과 같다.

3.2 열팽창 계수에 따른 영향 분석

판넬과 퍼넬의 접합부에 걸리는 잔류응력과 유리재료의 열팽창 계수의 상관관계를 알아보기 위하여 열팽창 계수가 다른 A 회사와 B 회사의 제품을 이용하여 해석을 수행하였다. 각 재료에 대한 주요 열적 특성은 Table 2 와 같다. 여기서 P는 판넬, F는 퍼넬을 의미한다. Table 2 에서 A 회사 판넬의 열팽창 계수는 B 회사의 경우보다 더 큰 반면에 열전도 계수는 오히려 B 회사가 더 큼을 알 수 있다. 따라서 외부에서 열을 받아서 동일한 온도조건이 될 때, A 회사의 판넬이 국부적으로 더 변형이 증가할 것으로 판단되어진다. 그리고 소성로 공정의 냉각 구간에서는 프리트가 판넬과 퍼넬에 완전히 접합된 상태이므로 상호간의 열수축량의 영향을 받게 되는데, A 회사 판넬의 경우 승온구간(heating zone)에서 늘어난 팽창량이 B 회사의 경우보다 많기 때문에 상온으로 온도가 도달할 동안 수축량도 많게 된다. 그러나 프리트와 판넬, 퍼넬의 열팽창량이 각각 다르기 때문에 열팽창계수가 큰 판넬에 국부적인 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 영향으로 최종적으로 잔류응력이 발생하게 되며, Fig. 5 의 실험 결과에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 8 에는 A 회사와 B 회사의 판넬과 퍼넬을 사용한 경우에 소성로 공정을 지나서 발생하는 잔류응력(residual principal stress)의 분포를 해석한 결과를 나타내었다.

Fig. 8 의 (a)에서 판넬의 접합면에 큰 인장응력 형태의 잔류응력이 발생함을 알 수 있다. 그리고 해석에서 구한 판넬면의 최대 인장응력 크기는 Fig. 8(a)와 (b)에 보인 바와 같이 A 회사의 경우에는 16.15MPa 이며, B 회사의 경우에는 8.83MPa 로 나타났다. Table 3 에는 제조사별로 20 개의 시료를 각각 만들어 실험적으로 재생공정을 거친 결과 분리된 양품율과 해석에서 구한 최대 인장응력의 크기를 나타내었다.

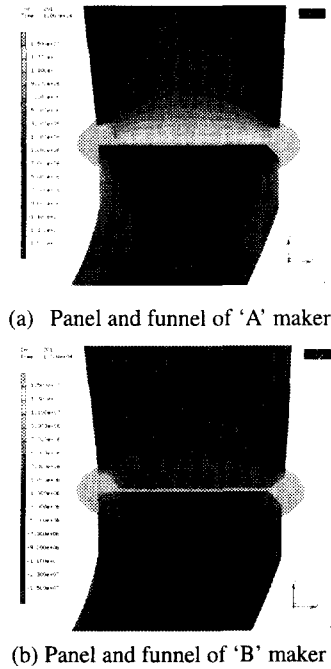


Fig. 8 Principal stress of panel and funnel of two makers after frit sealing process (unit:Pa)

Table 3 Experimental results of the recycling ratio and analytical results of maximum tensile stress

Maker	Recycling ratio (%)	Max. tensile stress (MPa)
A	30	16.15
B	75	8.83

Table 3의 결과에서 분리 양품률과 판넬면의 인장응력의 크기는 상호 연관성이 있으며, 거의 비례적인 관계를 나타내었다. 그리고 이러한 잔류응력의 크기는 판넬과 퍼넬의 열적 물성 중 열팽창 계수에 따라 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

따라서 재생활 향상을 위한 문제는 판넬과 퍼넬의 열 팽창계수를 고려해야 한다.

Table 3의 해석결과는 Table 2에 나타낸 것처럼 제조사별 판넬과 퍼넬의 물성치가 열팽창 계수와 열전도 계수가 모두 다르기 때문에 순수하게 열팽창 계수만의 영향이라고는 판단하기 어렵다. 따라서, 여기서는 열전도 계수의 영향을 알아보고 앞 절의 해석결과에 대하여 같이 검토하였다.

열전도 계수만의 영향을 평가하기 위하여 열팽창 계수는 고정하고 인위적으로 열전도 계수만 변화시켜서 잔류응력의 변화량을 살펴보았다. 이것은 실제 실험적 방법으로 물성치를 변경시켜서 접근하기 어렵기 때문에 해석적 방법으로만 검토하였다.

Table 4 Comparison the tensile stress of 'A' maker model with that of modified model

Model	Thermal conductivity (W/m·K)		Tensile stress (MPa)
	P	F	
'A' maker	P	0.981	16.15
	F	0.920	
Modified model	P	1.330	16.11
	F	1.254	

해석에 사용된 모델은 Table 2에 나타낸 A社의 판넬 및 퍼넬의 열팽창 계수와 열전도 계수를 사용한 모델과 A社 물성치에서 열전도 계수만 B社의 값으로 대체한 모델이다. 이러한 두 가지 모델을 해석하여 열전도 계수 변화에 따른 잔류응력 변화를 알아보았다. 해석에서 구해진 판넬면에 나타난 최대 인장응력 변화값을 Table 4에 정리하였다. 그리고 P는 판넬, F는 퍼넬을 의미한다.

위의 결과에서 열전도 계수의 변화에 따른 잔류응력의 변화는 0.3% 이내임을 알 수 있다. 따라서 앞에서 기술한 것처럼 잔류응력에 대부분 영향을 주는 열적 특성은 열팽창 계수임을 알 수 있다.

3.3 분리율 향상을 위한 제조사별 조합조건

음극선관 제조사에서는 부품공급의 원활화 및 제조공정의 합리화를 위하여 몇 개의 판넬 및 퍼넬 제조사로부터 납품된 제품을 혼용하여 사용하는 경우가 일반적이다. 따라서, 여기서는 A社와 B社의 판넬과 퍼넬을 혼용하여 사용할 때 재생공정에 가장 유리한 조합조건에 대하여 알아보았다.

Fig. 9에는 네 가지 판넬 및 퍼넬의 제조사별 조합에 따른 소성공정 이후의 잔류 주응력 분포 결과를 나타낸 것인데, Fig. 9 (a)는 판넬과 퍼넬을 모두 B社의 제품을 사용한 경우이며, (b)는 판넬은 B社 그리고 퍼넬은 A社 제품을 사용한 경우이며 (c)는 판넬은 A社 그리고 퍼넬은 B社 제품을 사용한 경우이다. 그리고 (d)는 판넬과 퍼넬 모두 A社의 제품을 사용한 경우이다. 각 조합조건에 대한 인장 잔류응력의 최대값은 Table 5에 나타내었다.

Table 5의 결과로부터 판넬의 열팽창 계수가 작을수록 판넬에 걸리는 인장 잔류응력이 줄어들음을 알 수 있다. 따라서, 재생공정에서 판넬의 쪽 떨어짐 현상을 줄이기 위한 조합조건은 Fig. 9의 결과와 같이 (a), (b), (c), (d) 순서로 나열된다.

그리고 동일한 판넬에 열팽창 계수의 차이가 나는 퍼넬을 접합시킨 경우에서 판넬과 퍼넬의 열팽창 계수의 차이가 작을수록 Table 6에 나타낸 바와 같이 판넬의 내면부에 인장 잔류응력의 크기가 줄어들음을 알 수 있다.

이것은 판넬과 퍼넬이 유사한 열팽창 계수를

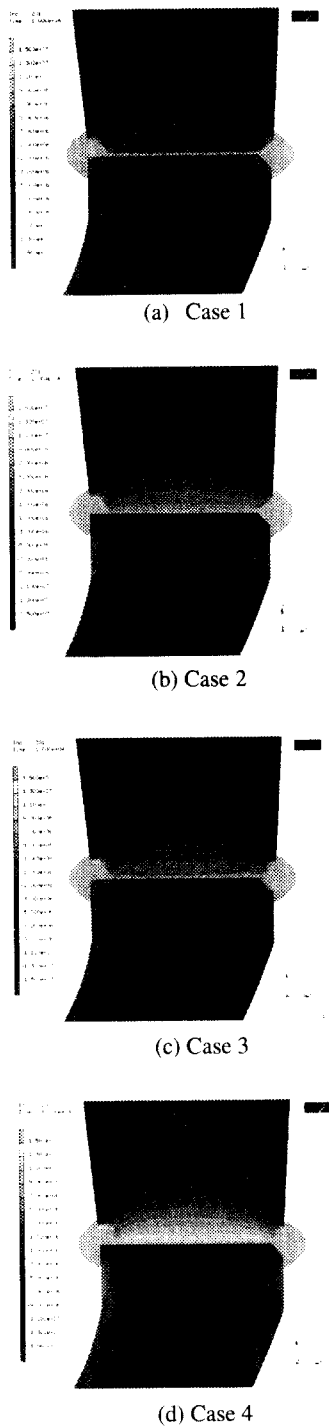


Fig. 9 Residual principal stress distributions of four cases

Table 5 Comparison of tensile stresses

Case	Max. tensile stress (MPa)
Case 1; P(B)+F(B)	8.83
Case 2; P(B)+F(A)	10.31
Case 3; P(A)+F(B)	14.46
Case 4; P(A)+F(A)	16.15

Table 6 Comparison of residual stresses in four cases

Panel	Funnel	Δ Coeff. of thermal expansion($1/^\circ\text{C}$)	Tensile stress (MPa)
A maker	A maker	0.057e -05	16.15
	B maker	0.031e -05	14.46
B maker	A maker	0.033e -05	10.31
	B maker	0.007e -05	8.83

가진 경우에 소성로 공정에서 인장과 수축량도 유사하게 됨으로써 공정 중 열팽창량 차이로 인한 열 응력 발생이 작아지기 때문이다. 따라서 공정 상에서 판넬과 퍼넬의 공급업체가 다른 경우 혼용하여 사용하는 것이 일반적이는데 이때에 판넬과 퍼넬의 조합 결정시 열팽창 계수의 차이를 검토할 필요가 있음을 알 수 있다. 이것은 판넬과 퍼넬이 유사한 열팽창 계수를 가진 경우에 소성로 공정에서 인장과 수축량이 유사함으로써 공정 중 열팽창량 차이로 인한 열 응력 발생이 작아지기 때문이다. 따라서 판넬과 퍼넬의 조합을 결정할 때, 열팽창 계수의 차이를 검토할 필요가 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 재생 분리율 향상을 위한 판넬 및 퍼넬 재료선정에 대한 결론을 다음과 같이 내렸다.

- (1) 판넬면의 쪽 떨어짐 현상은 소성로 공정 이후에 발생하는 판넬면의 인장 잔류응력 크기에 영향을 많이 받는다.
- (2) 판넬면의 잔류응력은 판넬 및 퍼넬의 열팽창 계수가 클수록 거의 비례적으로 증가한다.
- (3) 재생공정에서 분리율 향상을 위해서는 열팽창 계수가 작은 재료를 선정하는 것이 가장 중요하며, 제조사별로 차별이 심함을 알 수 있다.
- (4) 판넬과 퍼넬을 제조사별로 혼용해서 사용할 경우 판넬의 열팽창 계수가 작은 조건이 재생공정에 유리하다. 그리고 판넬과 퍼넬의 열팽창 계수 차이가 작을수록 접합면에 걸리는 인장 잔류응력

의 크기가 줄어들기 때문에 재생공정에 좋은 조합임을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Elst and Wielengna, D.K., 1977, "The Finite-Element Method and the ASKA Program, Applied in Stress Calculations for Television Picture Tube," Phillips Tech. Rev., Vol. 37, pp. 56~71.
- (2) Enstrom, Stepleman, R.S. and Appert, J.R., 1978, "Application of Finite-Element Methods to the Analysis of Stress in Television Picture Tube," RCA Rev., Vol. 37, pp. 665~698.
- (3) <http://www.techneglas.com>, 2000, "Television Solder Glass Technical Report of Techneglas."
- (4) MSC software, 2000, MARC User's manual.