

소형 LCD 도광판의 사출성형에 관한 연구 (1) : 유한요소해석 및 금형설계

이호상*

(2002년 3월 15일 접수)

A Study on the Injection Molding for the Light Guide Plate of a Small Sized LCD (1) : Finite Element Analysis and Mold Design

Ho-Sang Lee

Abstract

The light guide plate of the TFT-LCD reflects the light originated from the light source, and guides the light to the front side of LCD so that we can see images vividly. This paper is concerned with the injection molding of the light guide plate for the reflective typed LCD related to IMT-2000. The finite element analysis has been carried out based on the plane stress theory to predict both the thermal stresses of the products in the post-filling stage and the in-plane deformation behavior of the products after ejection process. Based on the simulation results, the mold for the light guide plate of a 2inch sized LCD has been designed.

Key Words : Injection Molding, Mold Design, Finite Element Analysis, Light Guide Plate, LCD

1. 서론

최근 IT(Information Technology)의 활성화로 많은 전자·통신 기기 부품들의 수요가 늘어나고 있다. 특히 국가적인 사업으로 추진하고 있는 IMT-2000은 2GHz대의 주파수를 사용하여 한 대의 단말기로 세계 어디에서든지 음성, 데이터, 동영상 전송이 가능한 차세대 영상 이동

통신으로서 2005년에는 전세계 이용자가 1억 5천만 명에 달할 것으로 전망되며, 단말기 시장은 연간 605억 달러에 이를 것으로 추정된다. 이때 고부가가치를 갖는 핵심 부품중의 하나는 CRT대체용으로 그 수요가 급격히 증가하고 있는 TFT-LCD(Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display)로서, 이는 전자손목 시계, 전자계산기, 노트북, PDA, 휴대전화 및 기타 문자 도형 표시장치 등

* 충주대학교 기계설계학과 / 나노기술연구소

에 사용되는 액정표시를 말한다. TFT-LCD는 CRT에 비해 시인성이 우수하고, 평균소비전력은 같은 화면 크기의 CRT에 비해 30~40%정도이며, 발열량이 적은 장점을 갖고 있다. TFT-LCD의 반사형 도광판은 광원(LED, CCFL등)에서 나온 빛을 반사 및 확산을 통하여 LCD전면에 적절한 광도를 제공하여 사용자가 문자 및 영상을 인식하도록 하는 부품으로서 사출성형후 안정적 인 치수 정밀도, 휘도(Brightness), 휘도의 균일도(Uniformity)등이 매우 중요하다.

본 논문의 제(1)편에서는 사출성형 공정 및 도광판의 변형해석을 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석을 수행하고, 도광판용 금형을 설계하였다. 그동안 사출성형품의 휨, 변형을 해석하기 위한 노력으로 열에 의한 잔류응력에 관한 많은 연구가 진행되어왔다.

Rezayat와 Stafford⁽¹⁾는 이방성 재료에서의 잔류응력을 해석하기 위해 Lee와 Rogers⁽²⁻³⁾의 1차원 열응력 이론을 수정하여 transversely isotropic thermo-viscoelastic 모델을 제안하였다. 특히 섬유가 보강된 재료의 해석에 효과적이며 유도된 모델에서는 각 두께 층에서의 냉각이 일정한 속도로 일어나는 경우에 대해 응력이완을 계산할 수 있다. Baaijens⁽⁴⁾는 유동에 의한 잔류응력과 열에 의한 잔류응력을 해석하기 위해 용융상태에서 Leonov 모델을 사용하고 고형화된 상태에서는 일반화된 Maxwell 모델을 사용하였다. 금형 내에서 성형품의 응력과 변형을 변화량을 계산하기 위해 평면응력 조건에서의 유한요소 해석을 수행하였다. Edujlee등⁽⁵⁾은 반결정성수지인 PE-EK에서의 열응력을 고찰하기 위해 열탄성 모델을 사용하여 응력증분식을 유도하였다. 특히 결정화도의 영향을 효과적으로 고려할 수 있는 kinetic 모델을 제안하였다. Chang⁽⁶⁻⁷⁾은 기존의 K-BKZ 모델을 일반화된 형태로 확장하여 통합 K-BKZ 점탄성 모델을 개발하고 유동에 의한 잔류응력과 열에 의한 잔류응력을 계산하였다.

또한 성형품을 금형에서 취출한 후에는 탄성체로 가정하고 각 요소에 대해 잔류응력을 두께방향으로 적분하여 응력 텐서와 모멘트를 구하고 변형해석을 수행하였다. 이때 3차원 솔리드 요소를 사용하여 두께 방향으로의 수축과 성형품 표면에서의 싱크마크를 예측하도록 하였다.

Jansen과 Titomanlio⁽⁸⁾는 간단한 탄성모델을 사용하였으며 금형 내에서의 변화하는 경계조건을 효과적으로 고려하여 잔류응력과 수축량을 계산할 수 있는 해석적인 식을 유도하였다. Liu⁽⁹⁾는 열유도 잔류응력과 굽힘 해석을 위해 점탄성 상변화 모델을 제안하였다. 이때 고체상태에서는 점탄성 거동을 고려하고 용융상태에서는 단순히 점성유체인 것으로 가정하였다. 그리고 매 시간마다

8개의 절점을 갖는 요소를 사용한 유한요소해석을 수행하였다. Zoetelief등⁽¹⁰⁾은 보압이 열유도 잔류응력 분포에 미치는 영향을 연구하였으며 이를 위해 선형 점탄성 구성방정식을 사용하였고 계산결과를 측정된 잔류응력과 비교하였다.

본 논문에서는 선행 연구결과⁽¹¹⁾를 수정하여 온도에 따른 열전도율과 비열의 변화를 고려하였으며 충전 및 후 충전과정시 나타나는 금형내 캐비티에서의 불균일한 압력 및 온도에 의해 발생하는 도광판의 평면변형 거동을 해석할 수 있도록 평면응력 이론을 기초로 한 유한요소 해석 프로그램을 구성하였다. 그리고 IMT-2000용 2인치 LCD 도광판에 유한요소 해석을 적용하여 게이트 위치 선정, 변형량을 고려한 캐비티 치수를 설계하였으며, 최종적으로 금형을 제작하고 사출성형 실험을 통하여 변형 해석 결과를 확인하였다.

2. 유한요소해석

2.1 공정해석

사출성형공정은 크게 용융된 수지를 금형캐비티 속으로 주입시키는 충전과정과 냉각에 의한 수축을 보상하기 위한 후충전과정으로 나눌 수 있다. 공정해석을 위하여 충전과정에서는 비압축성 유동해석이 가능하지만 후충전 과정을 해석하기 위해서는 압력과 온도의 변화가 심하기 때문에 밀도변화를 고려한 일반화된 식이 요구된다. 수지는 열전달이 작기 때문에 캐비티의 중심부는 늦게 냉각되고 게이트가 완전히 굳기 전까지나 압력구배가 있는 한 여분의 수지가 계속해서 캐비티내로 유입되므로 압력이 최대치에 이르렀을 때에도 수지의 유동은 완전히 정지되지 않는다. 따라서 후충전과정에서는 비정상상태의 압축성, 비등온 유동문제해석이 요구된다. 또한 액체에서 고체로의 상변화를 겪게되며 냉각과정을 동반하게된다. 임의의 2차원형상에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\rho C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial z}(\chi(T) \frac{\partial T}{\partial z}) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (4)$$

여기서 x, y 는 평면좌표계이고 z 는 두께방향좌표를 나타내며 v_x, v_y 는 각각 x, y 방향으로의 속도성분이 다. 또한 ρ 는 밀도, C_p 는 비열, α 는 열전도계수, η 는 점도, T 는 온도, 그리고 $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률속도를 나타낸다.

두께면에서 속도성분이 영이 되는 경계조건을 적용하여 식 (1)-(3) 을 정리하면 압력에 대한 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (S \frac{\partial p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (S \frac{\partial p}{\partial y}) = G \frac{\partial p}{\partial t} + F \quad (5)$$

여기서 $S = \int_0^b \rho \int_{-\frac{z}{\eta}}^{\frac{z}{\eta}} dz \bar{dz}$ 이고 b 는 두께의 반이다.

이때 G 와 F 는 밀도의 압축성에 관한 항으로 다음 식으로 표현된다.

$$G = \int_0^\delta (\frac{\partial \rho_l}{\partial p})_T dz + \int_\delta^b (\frac{\partial \rho_s}{\partial p})_T dz \quad (6)$$

$$F = \int_0^\delta (\frac{\partial \rho_l}{\partial T})_p \frac{\partial T}{\partial t} dz + \int_\delta^b (\frac{\partial \rho_s}{\partial T})_p \frac{\partial T}{\partial t} dz + (\rho_l - \rho_s)_{z=\delta} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (7)$$

여기서 δ 는 고상과 액상의 경계위치이고 하첨자 l 과 s 는 액상과 고상을 의미한다. 식(7)의 마지막 항은 반결정성 수치 밀도의 불연속성을 나타낸다.

점성식으로는 WLF형의 함수를 확장한 7개의 상수를 사용한 Cross모델식을 사용하며 그 표현식은 다음과 같다.

$$\eta (\dot{\gamma}, T, P) = \frac{\eta_o(T, P)}{1 + (\frac{\eta_o \dot{\gamma}}{\tau^*})^{(1-n)}} \quad (8)$$

여기서 n, τ^* 는 전단박하(shear thinning) 거동을 나타내는 상수이며 η_o 는 다음 함수로 표현될 수 있다.

$$\eta_o = \begin{cases} D_1 \exp[\frac{A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)}] & T > T^* \\ \infty & T \leq T^* \end{cases} \quad (9)$$

이때 $T^* = D_2 + D_3P, A_2 = \bar{A}_2 + D_3P$

이며 $A_1, A_2, \bar{A}_2, D_1, D_2, D_3$ 는 점도에 관련된 물성 상수이다.

또한 압력-비체적-온도의 관계를 나타내는 상태방정 식으로는 Tait식을 사용할 수 있으며 비체적 v 는 다음 식과 같다.

$$v(P, T) = \begin{cases} (a_{0s} + a_{1s}(T - T_g))(1 - 0.0894 \ln(1 + \frac{P}{B_s})) & (T \leq T_g) \\ (a_{0m} + a_{1m}(T - T_g))(1 - 0.0894 \ln(1 + \frac{P}{B_m})) & (T > T_g) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T_g &= T_{g0} + B_2 p \\ B_m &= B_{0m} e^{-B_{1m} T} \\ B_s &= B_{0s} e^{-B_{1s} T} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 a_0, a_1, B_0, B_1, B_2 는 물성상수이며 하첨자 m 은 용융상태, 하첨자 s 는 고체상태를 나타낸다.

그리고 비열은 온도에 따라 변하므로 비결정성 수치에 대하여 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$C_p(T) = C_1 + C_2 \overline{T} + C_3 \tanh(C_4 \overline{T}) \quad (12)$$

여기서 $\overline{T} = T - C_5$ 이며, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 는 비열에 관련된 물성 상수이다.

또한 열전도율을 다음과 같이 온도의 함수로 표현할 수 있다.

$$k(T) = \Lambda_1 + \Lambda_2 \overline{T} + \Lambda_3 \tanh(\Lambda_4 \overline{T}) \quad (13)$$

여기서 $\overline{T} = T - \Lambda_5$ 이며, $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_4, \Lambda_5$ 는 열전도율에 관련된 물성 상수이다.

위에서 기술한 지배방정식(5)와 (4)식을 풀기 위해서는 유한요소법과 유한차분법을 사용하며, 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌⁽¹²⁾에 언급되어 있다.

2.2 평면변형 해석

용융된 수지를 금형내 캐비티로 충전하고 냉각시키는 과정에서 나타나는 불균일한 압력과 온도에 의해 발생하는 열응력을 해석하고 아울러 취출후 성형품의 평면변형 거동을 해석하고자 한다. 이때 일반적으로 사출성형품은 두께가 얇기 때문에 평면응력(Plane stress)상태를 가정할 수 있다. 평면응력 상태에서의 지배방정식은 다음과 같다.

평형방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

변형률 - 변위 관계식 :

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{\partial \delta_x}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial \delta_y}{\partial y}, \\ 2\epsilon_{xy} &= \frac{\partial \delta_x}{\partial y} + \frac{\partial \delta_y}{\partial x} \end{aligned} \quad (15)$$

구성방정식(응력 - 변형률 관계식) :

$$\sigma = C(\epsilon - \epsilon_o) + \sigma_o = C\epsilon + f \quad (16)$$

여기서

$$\sigma = \{ \sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{xy} \}^T \quad (17)$$

$$\epsilon_o = \{ \alpha \Delta T \quad \alpha \Delta T \quad 0 \}^T \quad (18)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$f = \{ f_{xx} \quad f_{yy} \quad f_{xy} \}^T = -C\epsilon_o + \sigma_o \quad (20)$$

또한 식(19)에서 C 의 성분은 직교성 재질 (Orthotropic material)의 경우 식(21)과 같으며 σ_o 는 초기 잔류응력(Initial residual stress)이고 α 는 선형열팽창계수 (Linear thermal expansion coefficient) 이다.

$$C_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad C_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (21)$$

$$C_{12} = \nu_{21} C_{11} = \nu_{12} C_{22}, \quad C_{33} = G_{12}$$

한편, 선형열팽창 계수(Linear thermal expansion coefficient) α 는 위에서 표현한 Tait식(10)을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{3v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right) \\ &= \frac{1}{3} [A(T, P)(1 + B_1 P) - K(T, P)B_2 P] \end{aligned} \quad (22)$$

여기서

$$K(T, P) = A(T, P)B_2 + \frac{0.0894}{B(T) + P} [1 - 0.0894 \ln(1 + \frac{P}{B(T)})]^{-1} \quad (23)$$

$$A(T, P) = \frac{a_{1j}}{a_{0j} + a_{1j}(T - T_g)} \quad (24)$$

$$B(T) = B_{0j} e^{-B_{1j} T} \quad (25)$$

$$j = \begin{cases} s & (T \leq T_g) \\ m & (T > T_g) \end{cases} \quad (26)$$

각 요소에 대하여 구성된 국부좌표계(x,y)를 기준으로 평면변위량 δ_x, δ_y 는 형상함수 (ψ)를 사용하여 다음과 같이 근사화된 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \delta_x(x, y) &= \sum_{j=1}^M \delta_{xj} \psi_j(x, y) \\ \delta_y(x, y) &= \sum_{j=1}^M \delta_{yj} \psi_j(x, y) \end{aligned} \quad (27)$$

(15), (16)식을 (14)식에 대입하고, (27)식과 함께 가중 잔류치법 (weighted residual method)을 사용하여 정리하면 다음 식(28)을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{ij}^{11} & K_{ij}^{12} \\ K_{ij}^{21} & K_{ij}^{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i^1 \\ F_i^2 \end{Bmatrix} \quad (28)$$

여기서

$$\begin{aligned} K_{ij}^{11} &= \int_{\Omega} h(C_{11} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + C_{33} \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y}) d\Omega \\ K_{ij}^{12} &= \int_{\Omega} h(C_{12} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial y} + C_{33} \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial x}) d\Omega \\ K_{ij}^{22} &= \int_{\Omega} h(C_{33} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + C_{22} \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \frac{\partial \psi_j}{\partial y}) d\Omega \\ K_{ij}^{21} &= K_{ji}^{12} \end{aligned} \quad (29)$$

$$F_i^1 = \int_{\Gamma} h \psi_i t_x d\Gamma - \int_{\Omega} h (\frac{\partial \psi_i}{\partial x} f_{xx} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} f_{xy}) d\Omega$$

$$F_i^2 = \int_{\Gamma} h \psi_i t_y d\Gamma - \int_{\Omega} h (\frac{\partial \psi_i}{\partial x} f_{xy} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y} f_{yy}) d\Omega$$

식(29)에서 h 는 성형품의 두께이며, f_{xx}, f_{xy}, f_{yy} 는 식(20)로부터 구한 각 절점에서의 값과 형상함수를 사용하여 식(30)과 같이 근사화시킬 수 있다. 또한 t_x, t_y 는 단위길이당의 Boundary force로 식(31)과 같다.

$$\begin{aligned} f_{xx}(x, y) &= \sum_{j=1}^M (f_{xx})_j \psi_j(x, y) \\ f_{xy}(x, y) &= \sum_{j=1}^M (f_{xy})_j \psi_j(x, y) \\ f_{yy}(x, y) &= \sum_{j=1}^M (f_{yy})_j \psi_j(x, y) \end{aligned} \quad (30)$$

$$t_x = \sigma_{xx}n_x + \sigma_{xy}n_y$$

$$t_y = \sigma_{xy}n_x + \sigma_{yy}n_y$$
(31)

충진과정에 대한 해석으로부터 캐비티에서의 압력과 온도값을 구할 수 있으며 이는 후충진과정 해석을 위한 초기조건으로 사용된다. 후충진과정 해석에서는 위에서 기술한 바와 같이 압축성을 고려하여 캐비티 모든 부분이 유리전이온도 이하로 냉각되는 시간까지 보압 유지시간을 적용하여 매시간 증분에 따른 압력과 온도값을 계산하고 보압 완료후에는 탄성변형으로 가정한다. 성형품이 금형 내에서 구속되어 있는 동안 불균일한 압력과 온도 변화에 의하여 잔류응력이 발생하게 된다. 먼저 금형 내에서 잔류응력 해석을 위하여 금형과 접하는 외곽경계면을 따라서 변위를 영으로 구속시키고 식(28)을 풀어 내부 절점에서의 변위를 구하고 잔류응력을 계산한다.

이때 ΔT 는 보압이 끝난 후 각 절점에서의 두께방향 평균온도와 유리전이온도와의 차이로 계산된다. 또한 취출후 성형품의 변형해석을 위해서는 금형 내에서 발생한 잔류응력값을 초기응력으로 사용하고 제품의 모든 부분에서의 온도가 상온이 될 때를 기준으로 계산하며 이때 자유경계조건을 부여한다. 강제운동항을 제거하기 위하여 성형품의 변형거동에 구속을 주지 않으면서 전체 회전과 이동이 발생하지 않도록 참고문헌⁽¹¹⁾에서 설명한 바와 같은 하는 변위 경계조건을 사용한다.

3. 적용 결과

본 연구에서 적용한 IMT-2000용 2인치 LCD 도광판의 수지는 Teijin Chem/PC Panlite L-1225L 이며, 충진과정 및 후충진과정 해석을 연계한 잔류응력 및 변형 해석을 위하여 수지의 물성치는 C-MOLD⁽¹³⁾에 등록된 물성치를 사용하였다. 점성과 PVT데이터는 각각 Table 1 과 Table 2에 나타나 있다. 그리고 비열($J/kg^\circ C$)과 열전도율($W/m^\circ C$)은 각각 식(12), 식(13)을 사용하며 상수값들은 다음과 같다.

$$(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) = (1706.59, 2.524, 131.726, 0.06, 417.15)$$

$$(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) = (0.2388, 7.15 \times 10^{-4}, -0.021, 0.03, 417.15)$$

또한 잔류응력해석 및 변형해석에서는 등방체(Isotropic material)로 가정하였으며 사용한 탄성계수(E)는 2,800 MPa이고 포와송비 (ν)는 0.38이다.

Table 1 Parameters in Cross model

	0.17447
τ^* (Pa)	8.1002×10^5
D_1 (Pa.s)	1.19×10^{12}
D_2 (K)	417.0
D_3 (K/Pa)	0.0000
A_1	28.407
A_2 (K)	51.6

Table 2 Parameters in Tait equation

	melt	glass
a_0 (m^3/kg)	8.6531×10^{-4}	8.6531×10^{-4}
a_1 (m^3/kgK)	5.55×10^{-7}	2.27×10^{-7}
B_0 (Pa)	1.7×10^8	2.61×10^8
B_1 (1/K)	4.4286×10^{-3}	2.5282×10^{-3}
T_{go} (K)	417.15	
B_2 (K/Pa)	4.46×10^{-7}	

2인치용 LCD 도광판용 금형은 2 캐비티로 설계하였으며, 캐비티의 형상은 Fig. 1과 같다. 여기서 가로방향 길이 $L1=L2=47.389mm$ 이며, 세로방향 길이 $H1=H2=35.105mm$ 이다. 또한 두께는 그림과 같이 가운데 부분이 볼록한 형태로 변하면서 반사되는 빛이 균일하도록 광학적으로 설계하였다. Table 3에 나타난 성형조건을 사용하여 충진과정을 해석하고 압력 및 온도분포값을 초기조건으로 하여 후충진과정을 해석하였다.

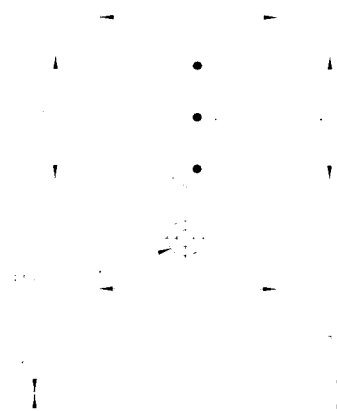


Fig. 1 Configuration of the mold cavity

Table 3 Processing conditions

parameters	processing conditions
melt temperature (°C)	310
mold temperature (°C)	120
fill time (sec)	0.25
max. pack pressure (MPa)	109.5
holding time (sec)	6

3.1 금형설계

Fig. 1에 나타난 도광판의 왼쪽 면에는 광원램프가 설치되고, 오른쪽 면은 조립용 돌기가 설치되므로 하부의 가로 방향으로 팬게이트를 설치하는 것으로 금형을 설계하였다. 이때 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 오른쪽부위의 두께가 얇아 유동해석을 적용하여 좌우 동시충진 조건을 만족시킬 수 있는 게이트 위치를 도출하였다. Fig. 2는 충전시 유동진행도를 나타낸 것으로 동시충진 조건을 잘 만족하고 있으며 도출된 게이트 위치가 적절함을 알 수 있다. 또한 Fig. 3은 충전 후 캐비티 압력분포를 나타낸 것으로 두께가 불균일함에도 불구하고 좌우 압력 균형이 잘 만족되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 4는 충전과 보압과정을 포함하여 1.25초 후의 압력분포를 나타낸 것으로 스프루에서의 사출압은 109.5MPa이며 캐비티의 중반이후는 25.95MPa로 비교적 균일한 압력이 걸리고 있음을 볼 수 있다. Fig. 1에서 표시된 세 지점에서의 시간에 따른 압력추이를 나타내는 Fig. 5를 보면 캐비티의 중간인 B지점부터는 약 3초에서 캐비티 압력이 0으로 떨어지게 됨을 볼 수 있는데, 이는 두께가 매우 얇아 빠른 시간에 고화되기 때문이며, 보압유지시간 선정의 기준이 될 수 있다.

Fig. 6은 금형 내에서 구속되어 있는 성형품의 취출전 x방향 잔류응력을 해석한 결과이다. 전체적으로는 인장응력이 걸리고 있으며 게이트 부근에서 가장 큰 31.4 MPa의 인장응력이 발생하고 있다. 또한 두께가 얇은 오른쪽 부분, 특히 모서리 부분에 잔류응력이 크게 걸리고 있으며, 상대적으로 두께가 큰 왼쪽이 작게 걸리고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7은 성형품을 취출한 후 잔류응력이 재분배된 결과를 나타낸 것으로 게이트에서 5.1MPa 정도의 잔류응력이 남아 있으며, 대부분의 영역에서는 매우 작은 인장응력이 남아있음을 볼 수 있다. Fig. 8은 성형품을 취출한 후 잔류응력이 풀어지면서 발생하는 변형과 대기 중 에서 온도강하에 의한 변형이 함께 나타난 변형형상으로

Fig. 1에 표시된 L1과 L2의 변형량은 각각 0.142mm와 0.141mm이며 H1과 H2의 변형량은 각각 0.110mm, 0.110로 예측되었다. 유한요소해석을 통하여 예측된 수축변형량을 고려하여 금형 캐비티의 크기를 설계하였다.

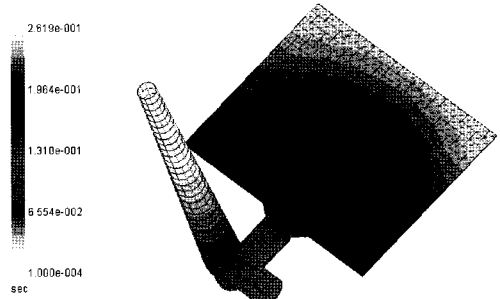


Fig. 2 Melt front advancement

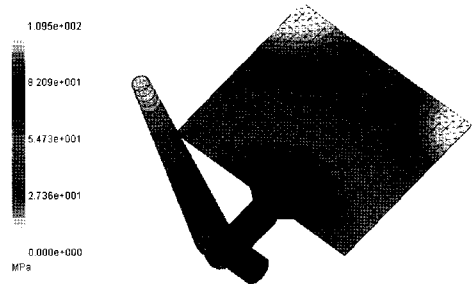


Fig. 3 Pressure distribution at the end of filling

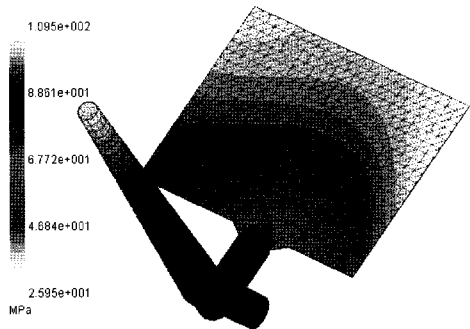


Fig. 4 Pressure distribution at 1.25 sec (packing stage)

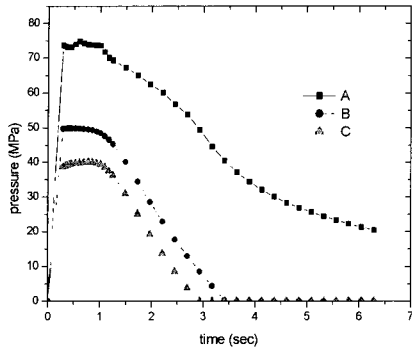


Fig. 5 The pressure trace at each point in Fig. 1

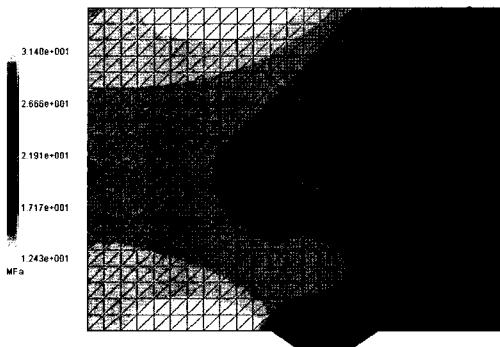


Fig. 6 The distribution of the thermal stress in x-direction before ejection

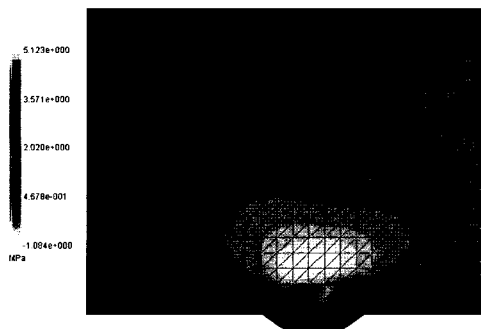


Fig. 7 The distribution of the thermal stress in x-direction after ejection

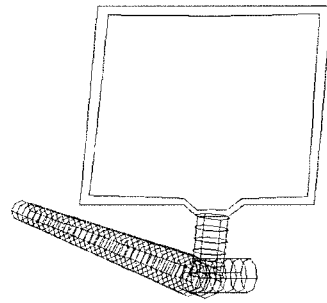


Fig. 8 The deformed shape

3.2 공정조건 선정

유한요소해석을 적용하여 충전시간, 보압유지시간등을 선정하였으며, 사출 성형실험의 기본 조건으로 설정하였다. Fig. 9는 충전시간의 변화에 따른 최대 사출압력의 변화를 나타낸 것으로 0.35초에서 사출압력이 85.87MPa으로 가장 낮음을 알 수 있다. 따라서 사출 압력이 가장 낮은 0.35초가 적절한 충전시간이 될 수 있다.

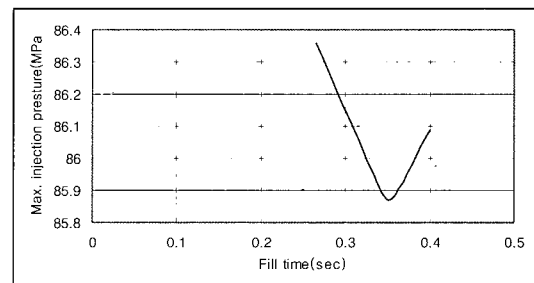


Fig. 9 Maximum injection pressure vs. fill time

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 보압유지시간이 2.5초, 4.0초 일 때의 게이트부분에서의 시간에 따른 체적 수축률을 나타낸 것이다. 2.5초일 경우에는 보압이 제거 되는 시점에서 급격한 체적 수축률의 증가가 나타나고 있으며 이는 게이트가 고화되기 이전에 보압이 제거되었기 때문이다. 그러나 보압유지시간이 4.0초인 경우에는 게이트 부분에서의 체적 수축률 증가가 없음을 볼 수 있다. 따라서 보압유지시간은 2.5초이상 4.0초 근처가 적절함을 알 수 있다.

한편 램 속도를 일정하게 한 경우에는 최대 전단응력이 1.61MPa, 최대 사출압력이 85.87MPa.으로 예측되었으

나, 유동선단의 속도가 일정하도록 Fig. 12와 같이 다단 램 속도 분포를 적용한 경우에는 최대단응력이 1.51MPa, 최대 사출압력이 73.32MPa로 크게 떨어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 Fig. 12의 램 속도 분포를 적용하는 것으로 하였다.

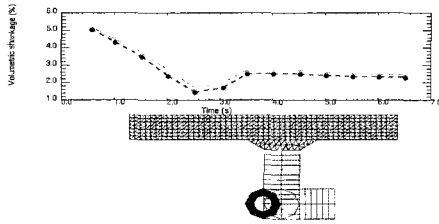


Fig. 10 Volumetric shrinkage at the gate (holding time = 2.5sec)

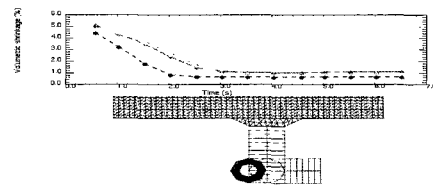


Fig. 11 Volumetric shrinkage at the gate (holding time = 4sec)

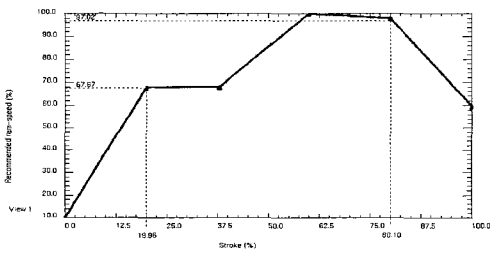


Fig. 12 Recommended ram speed profile(rel)

3.3 실험

유한요소해석을 적용한 금형설계조건을 사용하여 고정측 금형과 가동측 금형을 각각 제작하였다. 이때 두께가 변하는 코어부분은 니켈 코팅 후 다이아몬드 초정밀가공기를 사용하여 경면 가공을 하고 패턴을 추가하였다. 사출성형을 위해 FANUC 사의 Roboshot 50 i 사출성형기에 금형을 조립하고, (주)유스테크 코리아의 스위스산 TT-230 금형온도조절기를 사용하여 금형온도를 제어하

였다. 유한요소해석을 적용한 변형량 예측결과를 확인하기 위하여 Table 3과 동일한 성형 조건하에서 사출 실험을 수행하여 성형품을 취출하고 72시간이 지난 후 치수를 측정하였다. Table 4는 Fig. 1에서 표시된 각 캐비티 치수의 변화량에 대하여 유한요소해석과 실험의 결과를 비교한 것이다. 유한요소해석을 통해 예측된 결과는 약 20%이내의 오차범위에서 실험에 의한 측정결과와 유사함을 확인할 수 있다. 오차가 발생한 것은 잔류 응력 해석과정에서 응력이완(Stress relaxation)현상을 무시하고 등방성탄성체로 가정하는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

Table 4 Comparison between predicted and measured value

	δL_1	δL_2	δH_1	δH_2
predicted value (mm)	0.142	0.141	0.110	0.110
measured value (mm)	0.158	0.117	0.088	0.108

4. 결 론

IMT-2000용 2인치 LCD 도광판을 성형하기 위하여 충전 및 후충전과정시 나타나는 열응력과 취출후 도광판의 변형량을 예측할 수 있는 평면응력 이론에 기초한 유한요소해석 프로그램을 개발하였다. 해석 결과를 적용하여 도광판 금형을 설계하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 두께가 변하는 도광판 금형 캐비티에 대하여 동시 충전 조건을 만족하는 게이트 위치를 도출하였으며, 이 경우 압력 균형 조건이 만족됨을 확인할 수 있었다.

(2) 금형내에서 도광판의 잔류응력은 게이트에서 31.4 MPa의 가장 큰 인장응력이 발생하였으며, 취출후 잔류응력이 재분배된 이후에도 게이트에서 5.1MPa의 가장 큰 인장응력이 존재하였다.

(3) 사출압력을 최소화시킬 수 있는 충전시간, 체적수축율을 줄일수 있도록 하는 보압유지시간, 유동선단속도를 일정하게 하는 램 속도 분포를 선정하였다.

(4) 취출후 도광판의 변형량을 해석하고, 이를 고려하여 금형 캐비티의 치수를 설계하였다. 설계에 따른 금형을 제작, 실험을 통하여 변형해석 결과는 20%의 오차내에서 실험결과와 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 (주)엔투에이의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Rezayat, M. and Stafford, R.O., 1991, "A Thermoviscoelastic Model for Residual Stress in Injection Molded Thermoplastics", *Polymer Engineering and Science*, Vol.31, pp. 393~398.
- (2) Lee, E.H. and Rogers, T.G., 1963, "Solution of Viscoelastic Stress Analysis Problems Using Measured Creep or Relaxation Functions", *Journal of Applied Mechanics*, Vol.30, pp. 127~133.
- (3) Lee, E.H., Rogers, T.G., and Woo, T.C., 1965, "Residual Stresses in a Glass Plate Cooled Symmetrically from Both Surfaces", *Journal of American Ceramic Society*, Vol.48, pp. 480~487.
- (4) Baaijens, F.P.T., 1991, "Calculation of residual stresses in injection molded products", *Reological Acta*, Vol.20, pp. 284~299.
- (5) Eduljee, R.F., Gillespie, J.W., Maccullough, R.L., 1994, "Residual Stress Development in Neat Poly(Etheretherketone)", *Polymer Engineering and Science*, Vol.34, pp. 500~506.
- (6) Chang, R.Y. and Tsaur, B.D., 1995, "Experimental and Theoretical Studies of Shrinkage, Warpage, and Sink Marks of Crystalline Polymer Injection Molded Parts", *Polymer Engineering and Science*, Vol.35, pp. 1222~1230.
- (7) Chang, R.Y. and Chiou, S.Y., 1995, "A Unified K-BKZ Model for Residual Stress Analysis of Injection Molded Three-Dimensional Thin Shapes", *Polymer Engineering and Science*, Vol.35, pp.1733~1747.
- (8) Jansen, K.M.B. and Titomanlio, G., 1996, "Effect of Pressure History on Shrinkage and Residual Stresses -Injection Molding With Constrained Shrinkage", *Polymer Engineering and Science*, Vol.36, pp. 2029~2040.
- (9) Liu, S.J., 1996, "Modeling and Simulation of Thermally Induced Stress and Warpage in Injection Molded Thermoplastics", *Polymer Engineering and Science*, Vol.36, pp. 807~818.
- (10) Zoetelief, W.F., Douven, L.F.A., and Housz, A.J., 1996, "Residual Thermal Stresses in Injection Molded Products", *Polymer Engineering and Science*, Vol.36, pp. 1886~1896.
- (11) Lee, H.S., 1999, "In-Plane Deformation Analysis of Plastic Parts in the Injection Molding Process", *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 11~20.
- (12) Chiang, H.H., Hieber, N. and Wang, K.K., 1991, "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding, part I: Formulation and part II: Experimental Verification", *Polymer Engineering and Science*, Vol.31, pp. 116~125.
- (13) C-MOLD Shrinkage & Warpage User's Guide, 1995, AC Technology.