

# 고온 유리의 프레스 성형 공정 시뮬레이션

지석만\*, 최주호#, 김준범\*\*, 하덕식\*\*

## Numerical Simulation for Pressing Process of Hot glass

Suk Man Ji\*, Joo Ho Choi#, Jun Bum Kim\*\*, Duk Sik Ha\*\*

### ABSTRACT

This paper addresses a method for numerical simulation in the pressing process of hot glass. Updated Lagrangian finite element formulations are employed for the flow and energy equations to accommodate moving meshes. The model is assumed axi-symmetric and creep flow is assumed due to the high viscosity. Commercial software ANSYS is used to solve the coupled flow and energy equations. Moving contact points as well as free surface during the pressing are effectively calculated and updated by utilizing API functions of CAD software Unigraphics. The mesh distortion problem near the wall is overcome by automatic remeshing, and the temperatures of the new mesh are conveniently interpolated by using a unique function of ANSYS. The developed model is applied to the pressing process of TV glasses. In conclusion, the presented method shows that the pressing process accompanying moving boundary can be simulated by effectively combining general purpose software without resorting to special dedicated codes.

**Key Words** : Pressing Process (프레스 성형 공정), Lagrangian Finite Element Formulations (라그랑지 유한 요소 정식화), Hot Glass (고온 유리), Moving Boundary (이동 경계면), Automatic Remeshing (자동 요소 재생성)

### 1. 서론

프레스 성형 공정은 주로 유리나 폴리머 등의 재료를 고온의 용융 상태에서 주형에 투입한 후 플런저(plunger)라는 상형으로 압축하여 원하는 모양으로 성형하는 공정으로서 압축 후에 응고된 제품은 몰드와 플런저의 모양을 갖게 된다. 이 방법으로 만들어진 제품은 소재가 내부에서 구속되기 때문에 블로잉 같은 타 공정에 비해 더 정확한 치수를 가지는 반면 가압을 위한 대용량의 유압 프

레스가 필요하고, 플런저, 몰드의 정밀한 위치제어가 요구된다. 유리는 통상 약 990 ~ 1000°C의 온도에서 투입되어 프레스 중에 표면온도가 600~700°C로 급냉하게 되는데, 이때 유리는 점성 유체의 유동을 하며, 유리의 점도는 온도에 따라 극히 민감하게 변화하는 성질을 가진다. 따라서 유리의 온도는 프레스의 가압 속도나 압력과 함께 압축 후의 품질에 큰 영향을 준다. 온도가 낮은 경우, 낮은 프레스 속도나 압력은 유리가 채워지지 않는 unfill 불량률, 온도가 높은 경우 과다 압

접수일: 2004년 12월 3일; 게재승인일: 2005년 2월 18일

\* 지엠 대우 오토엔테크놀로지㈜

# 교신저자: 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

E-mail jhchoi@hau.ac.kr Tel. (02) 300-0117

\*\* 삼성코닝㈜

력은 high fin 이라는 돌출 불량을 유발한다. 또한 과도압력의 경우에는 고가의 유압장치를 사용하므로 이로 인한 손실도 발생한다. 한편 유리의 금형 접촉부는 낮은 온도로 인해 유동이 거의 없는 반면, 내부는 활발한 유동을 하므로 프레스 시 높은 온도의 내부 용융유리가 표면으로 밀려나오는 분수효과(fountain effect)가 발생하는데 경우에 따라서는 이것이 표면에 주름을 만들면서 링클(wrinkle) 불량을 유발하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 고온유리의 프레스 성형공정을 수치모사하고 이를 통해 여러 변수 변화에 따른 품질 영향을 분석함으로써 보다 과학적인 공정 셋업(set up)의 설정과 성형품의 열적 품질향상을 꾀하고자 한다. 유리 프레스 유동은 역학적으로 볼 때 열 전달 및 유체유동 방정식의 복합(coupling) 해석이 필요하며, 이동 경계(moving boundary) 및 자유 경계(free boundary)를 가진다. 따라서 해석과정 중에 메쉬의 재생성이 요구되며, 특히 유리가 채워지면서 유체/고체 접촉 점이 계속 변화하기 때문에 이를 제대로 고려하는 것이 매우 중요한 역할을 한다. 한편 이러한 이동경계를 수반하는 성형공정에 관한 시뮬레이션은 주로 금속의 다이캐스팅 주조나 단조와 같은 부피성형<sup>1,2</sup>, 폴리머의 사출성형<sup>3,4</sup> 분야에서 활발히 연구되었던 반면, 유리를 대상으로 한 것은 그리 많지 않다. Wang 과 McLay<sup>5</sup>는 라그랑지 정식화를 기반으로 과도(transient) 유체유동과 에너지 방정식에 대한 2 차원 유한요소해석 코드를 만들고 자동 메쉬 재생성과 이동접촉 점 계산을 위한 적절한 알고리즘을 개발하여 고온 유리의 프레스 공정을 분석하였다. 김충식<sup>6</sup>은 비교적 두께가 얇은 제품의 프레스를 대상으로 두께방향 유동을 무시한 일반화된 헬리쇼우 유동(Hele-Shaw flow)과 열 전달을 고려한 유한요소 해석코드를 만들어 TV 후면유리의 프레스 공정에 적용하였다. Hayashi<sup>7</sup> 등은 병 유리 성형공정을 대상으로 용융유리의 초기 온도가 성형에 미치는 영향을 조사하였는데, 축대칭 조건에서 유동과 에너지를 모두 고려하여 해석하는 HSMAC 이라는 코드를 사용하였다. 또한 Humphreys<sup>8</sup> 등도 병 유리에 관한 유사한 연구를 위해 전용의 코드를 만들어 작은 비이커의 성형문제에 적용하였다. 한편 유리 프레스와 같은 성형 시뮬레이션을 전문으로 하는 상용 소프트웨어도 있는데 대표적으로 POLYFLOW<sup>9</sup>, DEFORM<sup>10</sup>을 들 수 있으며, 이들은 3 차원 해석기능까지 제공하고 있

지만 비용이 매우 고가이다. 본 연구에서는 TV 전면유리의 프레스 시뮬레이션을 위해 축대칭 문제로 단순화하고, 범용 유동 해석 소프트웨어 ANSYS/FLOTRAN 을 활용하여 유동 및 열전달 문제를 해석하였다. 메쉬의 재생성 역시 ANSYS 의 자동 생성 기능을 활용하였다. 그러나 자유표면 형상 및 유체/고체 접촉 점의 갱신(update)은 ANSYS 에서 구현이 불가능하여 CAD 소프트웨어 Unigraphics 를 활용하였으며 자동화를 위해 C++ 코드에서 API 함수를 삽입하여 계산하였다. 이를 통해 본 연구는 CAD, CAE 에서 흔히 사용되고 있는 범용 소프트웨어를 적절히 조합함으로써 전용 소프트웨어에서나 가능한 유리 등의 프레스 공정 해석을 성공적으로 구현할 수 있음을 보였다.

## 2. 문제의 정식화

Fig.1 은 용융유리를 나타내는 곱, 곱을 압입하는 플런저, 그리고 곱이 투입되는 몰드를 나타내고 있다. 플런저에는 냉각을 위해 냉각수가 순환하고 있으며, 몰드는 공냉 되고 있다. 곱의 초기온

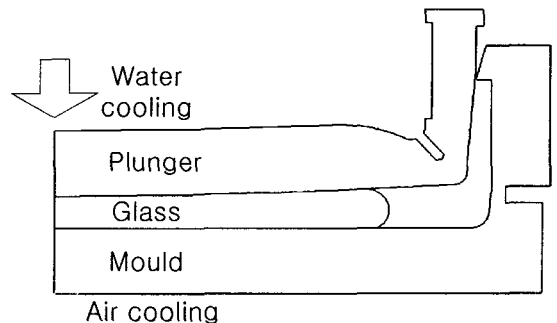


Fig. 1 Schematics for pressing model of hot glass

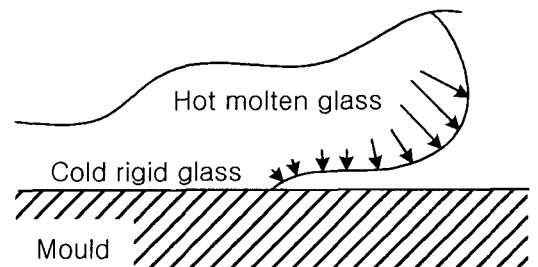


Fig. 2 An instance of fountain effects during the Pressing.

도는 통상 990~1000 °C 로서 이때의 유리는 뉴튼 점성유체의 성질을 가지며 온도감소에 따라 급격히 점성이 증가하게 된다. 플런저는 유압장치에 의해 하강하여 곱을 압입 성형하며, 이에 따라 유리는 빈 공간을 채워 나가게 된다. 금형 접촉면에서의 유리는 금형과 붙어서 금형과 같은 속도로 움직이거나 정지해 있으며 또한 금형으로 인해 이 부위는 냉각된다. 따라서 금형 접촉면 근방의 유리는 매우 큰 점도로 유동이 거의 없는 반면 유리 내부는 고온이 계속 유지됨에 따라 활발한 유동을 하므로 Fig.2 와 같이 특유의 분수효과(fountain effect)로 인해 내부 유리가 계속해서 새로운 접촉점을 만난다. 플런저는 초기에 일정 속도로 하강하다가 프래싱이 진행되면서 압력이 최대치에 도달하게 되면 속도가 감소하는데 플런저가 최대 하강 높이에 다다르면 움직임을 멈추고 이때의 압력 상태에서 냉각을 위해 수초간 정지하게 된다. 본 연구에서는 이러한 해석을 위해 2 차원 축 대칭 문제로 고려하였다. 지배방정식은 절점이 시간에 따라 이동하는 라그랑지의 정식화를 기반으로 하였으며, 유동방정식은 흐름이 상대적으로 매우 느리므로 정상상태의 느린 점성유동으로 가정하였다. 열 전달 방정식은 비정상 상태로 고려하였으며 이때 점성유동으로 인한 가열효과는 무시하였다. 이렇게 되면 점성유동과 열 전달의 두 방정식은 서로 분리하여 계산이 가능하게 된다. 이러한 가정은 여러 선행 연구에서 활용한 것이며, 이를 토대로 할 때 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.<sup>(4-8)</sup>

$$\text{연속 방정식} \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\text{유동 방정식} \quad -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} = 0 \quad (2)$$

$$\text{에너지 방정식} \quad \rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{v} = \{u, v\}$ ,  $p, T$  는 각각 속도벡터, 압력 및 온도를 나타내고,  $\rho, C, k, \mu$  는 각각 밀도, 비열, 열전도도와 점도를 나타내는데 본 연구에서는 이들을 상수로, 점도는 온도에 따라 크기가 변하는 값을 활용하였다. 플런저의 하강속도를  $V_p$  라 할 때 유동 경계조건은 미끄럼 방지 조건에 의해 플런저와 접촉면에서  $u = 0, v = V_p$  이며 몰드 접촉면에서는 모두 0 으로 주어진다. 접촉면에서의 열 전달 조건은 대류 경계조건을 활용했으며 주변 온도는

금형온도 500 °C 로 하였다. 열전달 계수 값은 Fellow 의 실험결과를 토대로 정하였다.<sup>11</sup> 그리고 자유표면에서는 자연 대류 조건을 부여했으며,  $h$ 를  $11.7W/m^2K$ , 공기온도  $T = 30$  °C 로 하였다.

### 3. 해석의 과정

시물레이션을 위해서는 프래싱이 진행되는 매 시점마다 정상상태의 점성유동과 과도상태의 열전달 계산을 하게 된다. 따라서 열전달 계산을 위해서는 바로 전 시간의 온도 값을 활용한다. 유동과 열전달 해석을 위해 ANSYS 의 FLOTTRAN 요소 FLUID141 과 THERMAL 요소 PLANE55 를 각각 활용하였다. <sup>12</sup> 시간스텝의 초기치를  $\Delta t^{(1)}$ , 플런저 하강속도의 초기치를  $V_p^{(1)}$ 로 할 때 해석의 순서는 다음과 같다.

- 1) 유리의 초기온도  $T^{(1)}$ 와 초기형상  $\mathbf{x}^{(1)}$ 를 지정.
- 2) 현 시점  $t^{(k)}$ 에서 주어진 온도분포  $T^{(k)}$ 와 플런저 하강조건 (속도  $V_p^{(k)}$  및 최대하중  $F_{max}$ ) 하에서 정상상태의 유동방정식을 풀고 속도벡터  $\mathbf{v}^{(k)}$ , 압력 분포  $p^{(k)}$ 를 계산한다.
- 3) 플런저에 가해진 총 하중  $F^{(k)}$ 을 계산하고,  $F_{max}$ 와 비교하여 이 보다 작으면 계속 진행. 그렇지 않으면 최대하중이  $F_{max}$ 가 되도록 플런저 하강속도  $V_p^{(k)}$ 를 감소시켜 스텝 2로 돌아간다.
- 4) 현 시점에서 플런저 하강높이가 한계 높이까지 내려왔거나 플런저 하강속도  $V_p$ 가 매우 작은 값 이하로 떨어지면 해석을 종료한다.
- 5) 시간  $t^{(k)}$ 에서의 온도분포  $T^{(k)}$ 를 대상으로 열전달 방정식을 풀어 시간  $t^{(k+1)} = t^{(k)} + \Delta t^{(k)}$ 에서의 온도분포를 예측. 여기서 시간스텝  $\Delta t^{(k)}$ 는 스텝 6에서 계산된 값을 활용한다.
- 6) 스텝 2에서 구한 속도벡터를 활용하여 다음 시점  $t^{(k+1)}$ 에서 유리 절점  $\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \mathbf{v}^{(k)} \cdot \Delta t^{(k)}$ 을 계산, 형상을 갱신한다. 이때 정확한 형상의 갱신을 위해 CAD 소프트웨어 Unigraphics를 활용하며, 이를 통해 적정 시간스텝  $\Delta t^{(k)}$ , 새로운 접촉점, 새로운 자유표면 등을 구한다. 한편 갱신된 형상에서 각 절점의 온도는 스텝 5에서 구한 온도  $T^{(k+1)}$ 이 된다.
- 7) 갱신된 형상에서의 요소 일그러짐을 없애기 위해 메쉬를 재 생성한다. 이를 위해 ANSYS의 자

동 메쉬 생성 기능을 활용하며, 이로 인해 절점이 재배치되므로 새로운 절점에서의 온도를 기존 절점의 온도로부터 내삽(interpolation)하여 계산한다. Iteration 스텝 ( $k+1$ )을 ( $k$ )로 갱신하고, 새로운 형상과 온도분포를 가지고 스텝2로 돌아간다.

스텝 3 에서 플런저에 가해지는 하중  $F$ 는 플런저가 일정속도로 하강할 경우 시간이 지남에 따라 그 크기가 증가하게 되는데 이 값이  $F_{max}$ 를 초과할 수 없으므로 이에 맞추어 하강속도가 감소하게 된다. 따라서 하중  $F$ 가  $F_{max}$ 가 되는 하강속도, 즉  $F(V_p) - F_{max} = 0$ 이 되는 속도  $V_p$ 를 구하기 위해 반복계산을 해야 하는데 이를 위해 Modified Regular Falsi 방법을 사용하였다.<sup>13</sup> 실제 계산 시에는 이로 인한 유동해석이 약 1~2 회만 증가되었다. 또한 열 전달 방정식을 통해 기존 형상 하에서 시간스텝 후의 온도분포를 계산하는 스텝 5 는 실제로는 CAD 를 통해 적정 시간스텝을 결정하는 스텝 6 이후에 진행하였다. 스텝 7 에서 절점 재배치로 인한 온도분포의 내삽은 ANSYS 의 CBDOF 기능을 활용하여 손쉽게 해결하였다. CBDOF 기능은 원래 국부 영역에 대해 메쉬를 보다 조밀화하여 추가 해석을 하려 할 때, 기존 해를 초기 메쉬에서 조밀 메쉬로 내삽하기 위한 용도로 만들어 졌는데, 본 해석을 위해 효과적으로 적용되었다.

#### 4. CAD 를 활용한 형상 갱신과 메쉬 재생성

프래싱 시뮬레이션을 위해서는 매 시점에서 구한 속도벡터와 시간스텝을 토대로 각 절점을 이동하고 이것을 가지고 다음 시점의 형상을 정의해야 한다. 이때 시간스텝이 지나치게 작으면 해석시간이 과도하게 길어지는 반면, 너무 크면 과도 열전달 해석이 부정확해 질 뿐 아니라 자유표면의 일부 절점이 몰드면을 관통하는 경우가 발생한다. 따라서 절점의 관통을 방지하려면 자유표면 절점 중에서 몰드면에 가장 근접한 점을 대상으로 이 점이 몰드면에 접촉하기 위한 시간스텝을 선택해야 한다. 그러나 이렇게 구한 시간스텝 역시 지나치게 작아지는 경향이 있다. 이런 점에서 효율적 해석을 위해서는 관통을 일부 허용하는 적절한 시간스텝을 지정할 필요가 있다. 이러한 작업을 위해서는 자유표면 각 절점의 속도벡터 방향에서 몰드

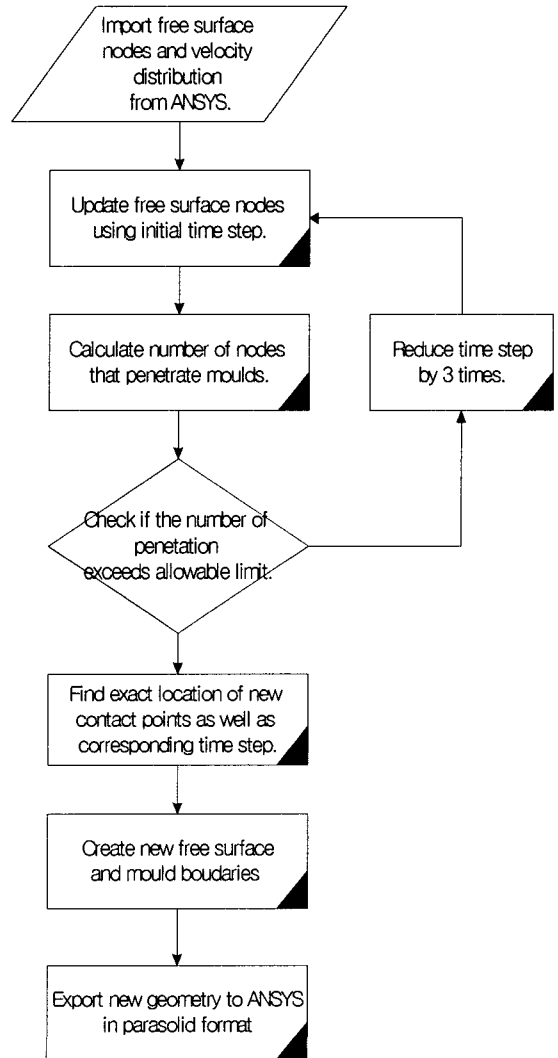


Fig. 3 Flowchart for updating scheme of contact point and free surface.

면까지의 거리계산이 필요한데 몰드가 자유곡면으로 구성된 경우 ANSYS 에서는 이러한 계산이 거의 불가능하다. 본 연구에서는 이를 위해 CAD 소프트웨어 Unigraphics 의 기능을 활용하였고, 이를 자동화 하기 위해 API 함수 및 C++언어를 사용하였다.<sup>14</sup> Unigraphics 내에서 자유표면을 갱신하는 과정을 Fig.3 에 소개하였다. 일단 ANSYS 로부터 자유표면 절점과 속도벡터를 입력 받으면, 임의로 선정된 시간스텝 하에 새 절점 위치를 계산하고 이들 중 몰드를 관통한 절점의 개수를 알아낸다.

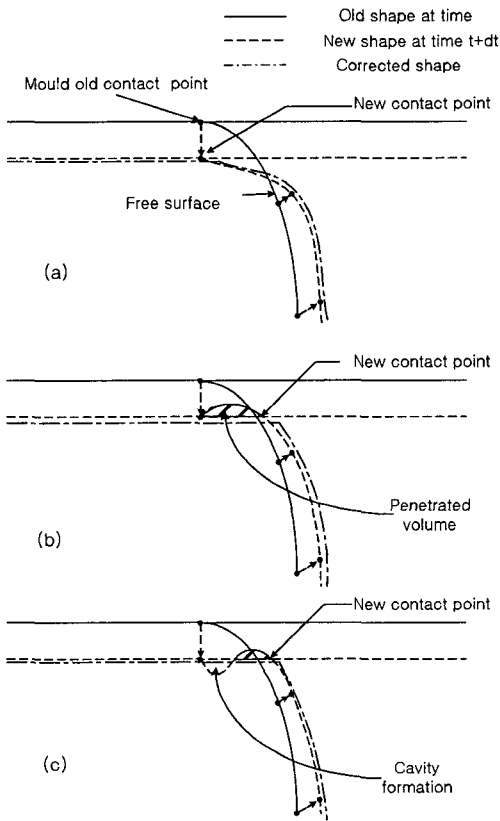


Fig. 4 Definition of new contact point and correction of new free surface (a) contact point is preserved (b) contact point moves and penetrated volume occurs (c) contact point moves and penetrated volume and cavity occurs.

그 개수가 자유표면 전체 절점 개수의 1/5 보다 크면 지나치게 많은 절점이 관통한 것으로 간주하고 그 이하로 떨어지도록 시간스텝을 감소시킨다. 이렇게 결정된 시간스텝 하에서 새로운 유리/몰드면의 접촉 점을 찾고 이로부터 새로이 기하모델을 생성하여 Parasolid 포맷으로 ANSYS 로 보낸다. 한편 프래싱이 종반에 다다르면 이렇게 결정된 시간스텝 조차 매우 작은 값이 되어 많은 해석을 유발하게 되는데 이 역시 해석의 효율화를 위해 최소값을 0.01 초로 정하고 항상 그 보다 큰 값에서 진행되도록 하였다. 자유표면 형상의 갱신 과정은 접촉 점의 변화에 따라 Fig.4 와 같이 3 가지로 나누어 설명할 수 있다. 첫째, 초기진행 시 나타나는

경우로 Fig.4(a)와 같이 주어진 시간스텝 하에서 자유표면 절점들이 아직 몰드면을 관통하지 않는 단계. 이때는 접촉 점들이 그대로 유지되므로 자유표면 형태를 새로 정의할 필요가 없다. 둘째, Fig.4(b)와 같이 자유표면의 절점 일부가 지나치게 진행되어 몰드를 관통하는 경우로서 이때는 접촉 점을 새로운 위치로 이동한다. 그리고 이로 인해 발생하는 관통체적은 무시하며, 관통한 절점들은 모두 몰드면에 접촉된 것으로 간주한다. 이 경우에는 체적의 손실이 어쩔 수 없이 발생한다. 셋째, Fig.4(c)와 같이 분수효과가 심한 경우로 유리 내부가 접촉면 근방보다 더 큰 속도로 진행할 경우 나타날 수 있다. 이때는 이동된 자유표면이 금형면과 두 점에서 만나는데 기존의 접촉 점과 첫째 점 사이는 유리가 없는 공기로 채워지는 공간이 되지만 이런 경우를 포함하게 되면 해석이 매우 복잡해지므로 본 연구에서는 이를 무시하였다. 따라서 새로운 접촉 점은 둘째 점으로 정하고 새로운 자유표면이 이 점에서 시작하며, 이 접촉 점과 기존 접촉 점 사이는 모두 금형면에 접촉되어 있는 것으로 간주한다. 이 경우에는 상황에 따라 체적의 손실 또는 증가가 발생할 수 있다. 상기와 같은 기준 하에 실제 해석을 수행한 결과 체적 손실이 어쩔 수 없이 발생하나 적절히 작은 시간스텝으로 진행하면 손실의 크기가 그리 크지 않아 타당한 결과를 얻을 수 있었다 따라서 본 연구에서는 체적의 손실 정도를 결과 정확도 판별의 척도로 사용하였다. Unigraphics 에서 만든 새로운 시점의 형상은 ANSYS 로 보내져서 이를 토대로 새로운 절점과 메쉬가 생성된다. 따라서 기존 형상에서 속도벡터 하에 시간스텝 만큼 이동된 절점들은 새로운 절점으로 대체된다. 한편 열전달 해석에 의해 예측된 새 온도분포는 기존 절점에 대해 생성되어 있으므로 이들이 새 절점에서의 값으로 조정 또는 내삽 되어야 한다. 이를 위해 ANSYS 의 CBDOF 기능을 활용하면 되지만 Fig.4(c) 와 같이 새로운 형상에 기공(cavity)이 형성되는 경우는 내삽이 불가능하게 된다. 이 경우 기존 메쉬는 Fig.5(a)의 형태로 이동되지만, Fig.5(b)와 같이 새로운 메쉬로 바뀌게 되는데 이 과정에서 새로운 메쉬의 절점 A 는 온도 내삽이 불가능한 문제가 발생한다. 이 문제는 항상 몰드면에서 발생하기 때문에 내삽이 실패한 절점에 대해서는 유리내면 절점 중 최근방 점의 값으로 대체하여 계산하였다.

이 또한 해석 정밀도 저하의 한 원인이 될 수 있으나, 실제 계산 결과, 무시할 만한 수준임을 확인하였다.

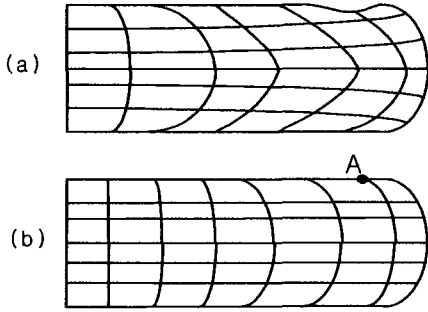


Fig.5 Comparison of old and new mesh  
(a) old mesh (b) new mesh by automatic remeshing function.

### 5. TV 용 유리의 프레싱 시뮬레이션

제안된 방법을 이용하여 TV 유리의 프레싱 공정 시뮬레이션을 수행하였다. 해석을 위한 조건으로는 굽 초기온도  $1000^{\circ}\text{C}$ , 유리 중심부 초기두께 130mm, 플런저 초기속도 100mm/sec, 플런저 최대하중 80kN 및 프레싱 종료시의 유리 중심부 두께 14mm 로 정하였다. 유리의 초기형상은 반지름과 높이가 동일한 원통형상으로 가정하고, 총 부피가 실제의 TV 용 유리와 동일한 부피가 되는 값이 되도록 정하였다. 해석결과로는 플런저 속도, 하중, 유리 중심부 두께 및 유리의 최고/최저 온도 등에 대해 시간에 따른 이력커브를 구하였다. 대표적 해석결과로서 요소크기 7mm, 시간스텝 0.185 초의 경우를 Fig.6 에 나타내었는데, 초기 일정속도로 프레싱이 진행되다가 0.843 초 후에 플런저 하중이 최대값에 도달하면서 속도가 감소하기 시작하여 최종적으로 6.3 초 만에 충진이 완성되었다. 이것은 실제 현장에서 측정된 커브와 비교할 때 비교적 잘 일치하는 것이다. 체적손실은 변화율을 부피 변화량을 초기값으로 나눈 비(%)라 했을 때 8.13 으로서 비교적 양호하였다. 온도분포는 지면관계로 Fig.6(c)에 최종 시점의 것만 표시하였으나 최대온도가 항상 유동의 선단부에 존재하면서 충전되었고, 몰드면 근방은 급속히 냉각되어 최종적으로 665 도까지 내려갔다. 한편 본 해석모델의 정밀도

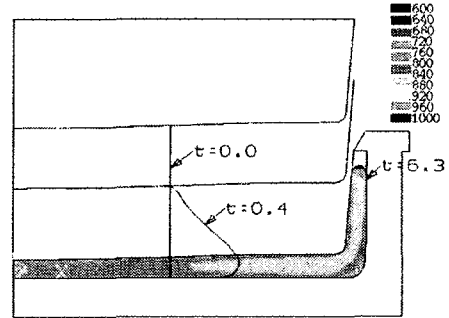
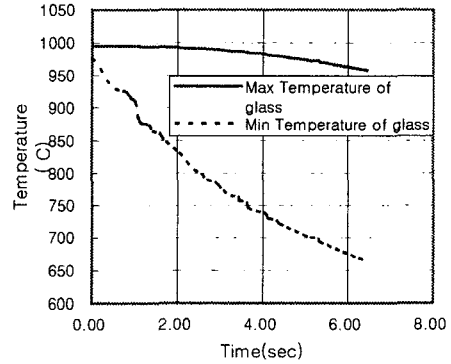
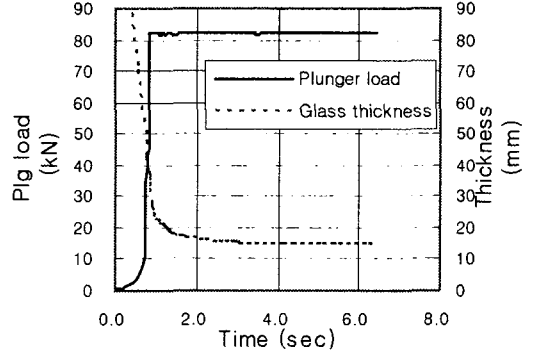


Fig. 6 Representative result of pressing simulation  
(a) glass thickness and plunger load (b) Max. and Min. temperature of glass (c) glass shapes and temperature contour at some specified time during pressing.

를 알아보기 위해 메쉬크기를 5mm, 10mm 로 시간 스텝을 0.18, 0.19 초로 각각 증감시켜서 해석

을 해보았는데 그 결과를 table 1 에 나타내었다. 이를 통해 요소 수 7mm 와 초기 시간스텝 0.185 초가 적절함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 플런저 초기 속도, 최대 하중 및 굽 초기온도의 변화에 따른 해석결과의 차이를 분석하였다.

Table 1 Comparison of results for different element size and time step.

Element size (mm)	Volume change rate(%) at final step	Maximum temp(C) of glass at final step	Minimum temp(C) of glass at final step
5	9.44	968	654
7	8.13	957	665
10			
Time Step (sec)			
0.18	7.86	956	665
0.185	8.13	957	665
0.19	9.57	964	640

5.1 플런저 초기 속도 변화

초기 속도를 기본 값에서 20, -20 만큼 증감시켰을 때 프레스 시뮬레이션을 수행했는데 그 결과 유리두께 이력을 Fig.8 에 보였다. 속도가 느린 경우 최종 두께가 14.7mm 에서 플런저 속도가 0 으로 감소하여 프레스가 종료되었다. 따라서 unfill 불량 이 발생하였으며, 이를 Fig.9 에 보였다. 속도가 가장 빠른 경우는 초기값 보다 프레스 완료시간이 6.3 초에서 5.5 초로 더 빨라졌음을 알 수 있다.

5.2 플런저 최대 하중 변화

최대하중을 기존 값에서 70, 90 kN 으로 증감시켰을 때의 결과를 Fig.9 에 보였다. 앞의 경우와 마찬가지로 70 kN 에서는 지나치게 작은 하중으로 인해 성공적으로 충전 되지 못하였음을 보이고 있다.

5.3 초기 굽 온도 변화

굽 온도를 1000 °C 에서 900, 950 °C 로 감소시킨 결과를 Fig.10 에 보였으며 역시 900, 950 °C 에서 미 충진이 발생하였다. 이 경우에는 성공적으로 충진이 되기 위한 초기 굽 온도를 해석을 반복하면서 찾아 보았는데, 그 결과 992 °C 가 임계 온도임을 확인하였고, 이때의 프레스 소요시간은 7.1 초였다. 통상 성형품질의 향상과 금형수명 연장을 위해서는 금형을 되도록 저온을 유지하기 위해 굽

온도를 낮추는 것이 바람직하는데, 본 해석을 통해 이 값이 992 °C 임을 알 수 있다.

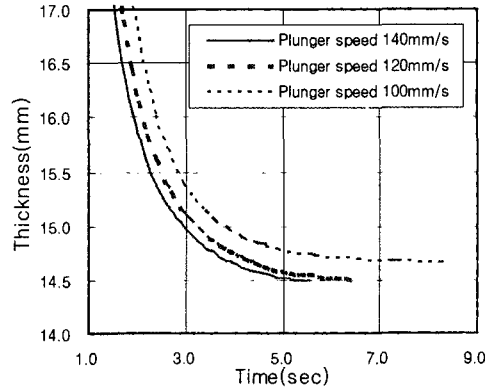


Fig. 7 Center thickness of glass under different initial plunger speed.

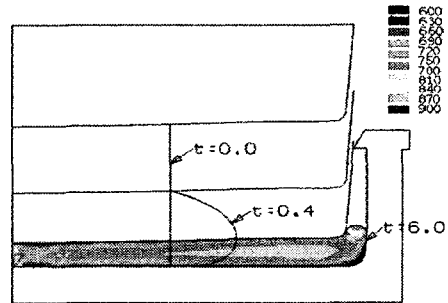


Fig. 8 Unfilled shape of glass when initial plunger speed is 100mm/sec.

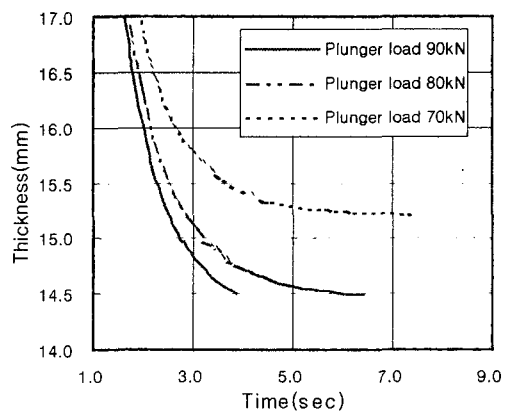


Fig. 9 Center thickness of glass under different maximum plunger load.

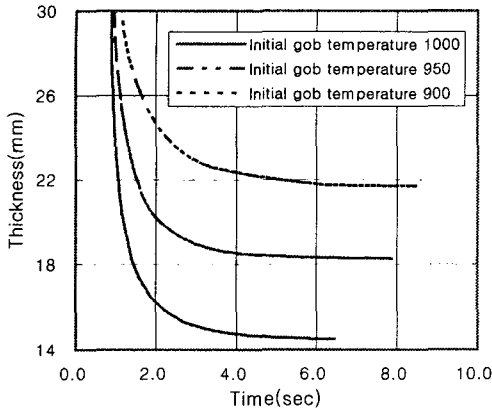


Fig. 10 Center thickness of glass under different initial gob temperature.

## 6. 결론

본 연구에서는 고온유리의 프레스 성형공정을 수치모사하고 이를 통해 여러 변수 변화에 따른 품질 영향을 분석함으로써 보다 과학적인 공정조건을 찾고, 성형품의 열적 품질향상을 꾀하고자 하였다. 본 연구에서는 문제를 축 대칭으로 단순화하고, 범용 유동 해석 소프트웨어 ANSYS 를 활용하여 유동 및 열전달 문제를 해석하였다. 그러나 프레스 시뮬레이션에서 흔히 나타나는 자유표면 및 접촉 점의 갱신은 ANSYS 에서 구현이 불가능하여 CAD 소프트웨어 Unigraphics 를 활용하였으며 자동화를 위해 C++ 코드에서 API 함수를 삽입하여 계산하였다. 개발된 방법을 TV 전면유리의 프레스 시뮬레이션 문제에 적용해 보았으며, 그 결과 플린저 속도, 압력 및 초기 굽 온도의 변화에 따른 프레스 특성의 변화와 미 충전(unfill) 불량 여부도 조사하였다. 특히 굽 온도는 되도록 낮은 것이 금형수명과 품질향상에 도움이 되므로 비록 축 대칭 단순화 문제이기는 하지만 성공적 충진을 위한 최저 임계온도도 알아 보았다. 본 연구를 통해 프레스 공정과 같이 열/유체가 복합되고, 이동경계와 접촉점을 가지는 복잡한 공정문제를 고가의 전용 소프트웨어를 사용하지 않고도 범용 CAD, CAE 소프트웨어를 적절한 조합하여 성공적으로 구현할 수 있음을 보였다.

## 참고문헌

1. Khayat, R. E. and Frayce, D., "Simulation of Transient 3D Free Surface Flow in a Shot Sleeve as Applied to Die Casting," Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov 12-17, San Francisco, CA, pp. 207~214, 1995.
2. Cho, J. R. and Yang, D. Y., "Three-dimensional Finite Element Simulation of Connecting Rod Forging Using a New Remeshing Scheme," Engineering Computations, Vol.15, No.6-7, pp.777~803, 1998.
3. Ahmed, A. and Alexandrou, A. N., "Compression Molding Using a Generalized Eulerian Lagrangian Formulation with Automatic Remeshing," Advances in Polymer Technology, Vol.11, No.3, pp.203~211, 1992.
4. Tanifuji, S. I., Kikuchi, T., Takimoto, J. I. and Koyama, K., "Overall Numerical Simulation of Extrusion Blow Molding Process," Polymer Engineering and Science, Vol.40, No.8, pp.1878-1893, 2000.
5. Wang, H. P. and McLay, R. T., "Automatic Remeshing Scheme for Modeling Hot Forming Process," Journal of Fluids Engineering, Vol.108, pp.465~469, 1986.
6. Kim, C. S. and Hurh, H., "Development of 3-dimensional Analysis Program for Press Forming of C-TV Funnel Glasses," Internal report of Samsung Corning, 1992.
7. Hayashi, M., HASEGAWA, T. and OHIWA, N., "Numerical Simulation of Glass-Pressing Process," Trans. of Japan Soc. of Mech. Engrg., Vol.61, No.591, pp.359~364, 1995.
8. Humphreys, C. E., Burley, D. M. and Cable, M., "Problems Arising in the Computation of the Flow of Molten Glass During a Pressing Operation," ZAMM, Vol.76, S4, pp.309~312, 1996.
9. <http://www.polyflow.be/>
10. <http://www.deform.com/>
11. Fellows, C. J. and Shaw, F., "A Laboratory Investigation of Glass to Mould Heat Transfer



During Pressing,” Glass Technology, Vol. 19(1), pp. 4~9, 1978.

12. ANSYS, “Thermal Analysis Guide Release 5.6,” SASI IP, Inc., 1999.
13. Conte, S. D. and Boor, C., “Elementary Numerical Analysis An Algorithmic Approach,” Third Edition, McGraw-Hill Inc., 1980.
14. UNIGRAPHICS, “UG/Open API Programmer’s Guide,” Unigraphics Solutions Inc., 1999.