

TV 유리의 반복 성형공정에서 금형 열사이클 해석을 위한 효과적 방법

최주호* · 김준범*** · 황정해** · 하덕식***
(2000년 2월 28일 접수)

An Efficient Method for Mold Thermal Cycle Analysis in Repeated Forming Process of TV Glass

Jooho Choi, Junbum Kim, Junghea Hwang and Duksik Ha

Key Words : Repeated Forming Process (반복성형공정), Thermal Cycle Analysis (열사이클 해석), Cyclic Steady State (반복적 정상상태), Exponential Curve Fitting (지수함수 맞춤), Heat Conduction (열전도), Plunger (플런저), Mold (금형), TV Glass (TV 유리)

Abstract

An efficient method is developed for plunger thermal cycle analysis in repeated forming process of the TV glass. The plunger undergoes temperature fluctuation during a cycle due to the repeated contact and separation from the glass, which attains a cyclic steady state having same temperature history at every cycle. Straightforward analysis of this problem brings about more than 80 cycles to get reasonable solution, and yet hard to setup stopping criteria due to extremely slow convergence. An exponential fitting method is proposed to overcome the difficulty, which finds exponential function to best approximate temperature values of 3 consecutive cycles, and new cycle is restarted with the fitted value at infinite time. Numerical implementation shows that it reduces the number of cycles dramatically to only 6~18 cycles to reach convergence within 1° accuracy. A system for the analysis is constructed, in which the thermal analysis is performed by commercial software ANSYS, and the fitting of the result is done by IMSL library. From the parametric studies, one reveals some important facts that although the plunger cooling or the glass thickness is increased, its counter part in contact is not much affected, due to the low thermal conductance of the glass.

1. 서론

재료 가공에 있어서 많이 사용되는 방법의 하나로 고온 가압 성형공정이 있다. 이는 금형 내에 용융 상태 원재료를 사출 또는 압입하여 형상을 만든 후 냉각시키는 방법인데, 금속성형을 위한 다이캐스팅, 플라스틱의 사출성형, 유리의 프레스링 공정 등을 들 수 있으며, 성형 냉각 후 별도의 후 가공 없이 고정밀 제품을 대량 생산한다는 점에서 매우 정

쟁력 있는 방법이다. 열전달 측면에서 볼 때 이런 공정에 사용되는 금형은 재료의 충분한 냉각과 함께 고품질을 위해 균일한 온도분포를 유지시켜야 하는 중요한 의미를 갖고 있다. 이를 위해 금형 내에는 각종 냉각 채널 또는 단열재 등이 장치되는데 이들과 관련한 열전달 계수 및 물성치의 불확실성과 함께 신설계 테스트의 어려움으로 인해 금형 설계는 거의 경험에 의존해 온 실정이다. 그러나 최근 각종 계측 및 CAE 기술 발전에 힘입어 과학적 냉각해석을 활용한 새로운 금형설계 시도가 증가하고 있다.

본 연구는 TV 유리 성형공정에서의 효과적 금형 열사이클 해석방법을 제시하고 이를 통해 금형 온도분포 개선과 성형품의 열적 품질향상을 꾀하는데 있다. 성형공정에서 금형은 고온재료의 투입, 압입

* 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail : jhchoi@mail.hankong.ac.kr

TEL : (02) 300-0053 FAX : (02) 3158-2191

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 삼성코닝㈜

성형 및 탈거를 반복적으로 행함에 따라 온도이력이 상승하강을 반복하는 과도(Transient) 열전달 특성을 가지며, 이러한 변화는 어느 정도 사이클이 지나고 나면 동일 이력이 반복되는 반복적 정상상태(Cyclic Steady State)에 도달하게 되는데, 금형의 열적 설계를 위해서는 이 상태에서의 온도분포와 이력을 규명해야 한다. 이를 위해서는 한 사이클 끝의 온도분포를 다음 사이클 초기조건으로 하여 계산을 한 후 일정 온도 분포로 수렴할 때까지 반복해야 하는데, 실제 계산을 해보면 어느 정도 근접된 결과를 얻기 까지 80 회 이상 소요될 뿐 아니라 수렴속도가 매우 느리기 때문에 정확한 답을 얻기 위한 계산종료 시점의 결정이 어려운 점이 있다. 이는 계산 효율 면에서 볼 때 2 차원은 물론이고 3 차원 해석의 경우 매우 심각한 문제가 된다. 본 연구의 핵심은 이를 10~15 회 만으로도 정확하게 해를 구하는 방법을 제시하는 것이다.

반복 성형공정에서의 금형 열전달 해석과 관련한 연구는 그리 많지 않으며 1961년 McGraw⁽¹⁾의 연구를 시작으로 Manthuruthil 등,⁽²⁾ Bonacina 등⁽³⁾이 금형의 유리 성형을 대상으로 각각 1 차원 및 3 차원 해석을 했는데 이들은 모두 단순 반복계산을 통해 해를 얻었다. 보다 최근에는 금속의 다이캐스팅 공정을 대상으로 한 Davey 등⁽⁴⁾의 연구도 있는데 여기서는 온도분포를 정상상태와 과도상태로 분류하여 해석하되, 과도상태에 대해서는 역시 단순반복을 통해 해를 얻었다.

본 연구에서 제시하는 방법은 금형 온도이력의 추세가 거시적으로 지수함수 거동을 보인다는 점에 착안, 매 3 사이클 계산결과를 가지고 온도이력을 지수함수로 맞추기(Fitting) 하고 이로부터 무한대 시간 후의 온도를 추정한 후 그것이 수렴할 때까지 반복하는 것이다. 이 방법은 수렴속도가 획기적으로 개선될 뿐 아니라 해의 상하한을 좁히면서 진행하기 때문에 참 해 영역을 조기에 알 수 있는 이점이 있다. 본 연구의 응용예로 TV 유리 성형용 상부 금형인 Plunger 성형공정에서의 열전달 해석을 실시, 매우 빠른 해를 얻었으며, 이를 토대로 몇가지 조건에 대한 Parameter Study 를 행하였다. 본 연구는 2 차원 축대칭 해석에만 국한하였고, 상용 소프트웨어 ANSYS 를 활용하여 열전도 해석을 하였으며, 지수함수 맞춤은 IMSL 최적화 라이브러리에 의한 최소자승 오차법으로 계산하였다.

2. TV 유리 성형공정의 열해석 모델

TV 유리의 성형은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 하

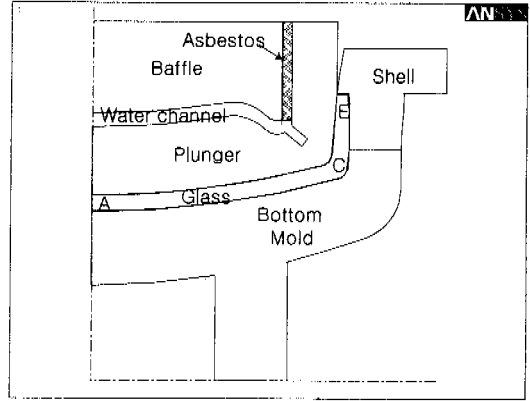


Fig. 1 Schematics of mold assembly for TV glass

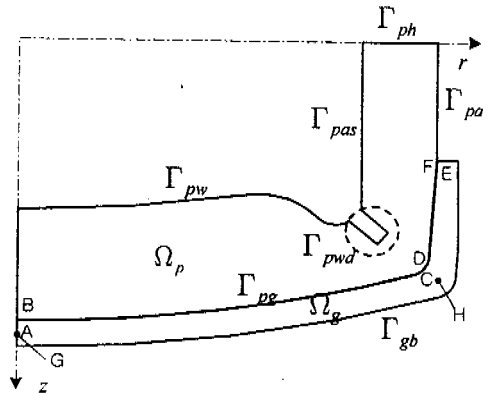


Fig. 2 Thermal analysis model of Plunger

부 금형(Bottom Mold), 측면 금형(Shell) 및 상부금형(Plunger)으로 이뤄진 공간을 용융유리가 채우게 된다. 유리는 이전 위치에서 하부와 측면 금형에 투입되며 압입 위치에 오면 Plunger 가 하강, 압입하여 성형한다. 압입은 순식간에 이뤄지고 이후 냉각을 위해 일정 시간 접촉상태를 유지하며, Plunger 상승 후 냉각된 유리는 하부금형과 함께 다음 위치로 이동하고 다시 새로운 유리와 금형이 들어 오는 것이 반복된다.

Plunger 는 유리 냉각을 위해 내부에 냉각수 채널을 갖고 있으며, Fig. 1 에서와 같이 유리 구석부 C 지점 냉각을 높이기 위해 드릴구멍이 있고 다리 지점 E 는 과냉방지를 위해 내면에 단열재를 부착하고 있다. 본 연구에서는 Plunger 가 관심 대상이므로 해석 모델은 Fig. 2 와 같이 Plunger 와 유리로 국한하며 2 차원 축대칭 문제로 단순화한다. Plunger 및 유리의 중심부 두께를 각각 42, 10 mm 로 정할 때, 나머지 형상 관련 치수는 그림을 통해 유추할 수 있다. 유리의 금형 접촉부를 포함, 냉각수 채널,

단열부 등 모든 경계는 상수 계수를 가진 대류경계 조건으로 가정한다. 한 사이클을 t_c 초, Plunger 의 유리 접촉시간을 t_d 초라 할 때, Plunger Ω_p 와 유리 Ω_g 는 각각 접촉과 분리를 반복하면서 점차 반복적 정상상태에 도달하는데, 유리는 항상 일정한 초기 온도에서 출발하는 반면, Plunger 는 첫째 사이클에만 주어지고, 다음부터는 초기 온도가 전 사이클 종료 시의 온도가 된다. 따라서 임의의 사이클에서 초기조건은

$$T = \bar{T}_g \quad \text{in } \Omega_g$$

$$T = \begin{cases} \bar{T}_p, & \text{when 1st cycle} \\ \bar{T}_{p_f}, & \text{when next cycle} \end{cases} \quad \text{in } \Omega_p \quad (1)$$

여기서 $\bar{T}_g, \bar{T}_p, \bar{T}_{p_f}$ 는 각각 유리, Plunger 초기온도 (통상 900 도 및 500 도로 지정) 및 바로 전 사이클 끝의 Plunger 온도이다. 본 논문에서 사용하는 온도 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이다. 유리와 Plunger 외곽에 적용되는 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q &= h_{gb}(T - T_b) & \text{on } \Gamma_{gb} \\ q &= h_{pa}(T - T_a) & \text{on } \Gamma_{pa} \\ q &= h_{ph}(T - T_h) & \text{on } \Gamma_{ph} \\ q &= h_{pas}(T - T_{wi}) & \text{on } \Gamma_{pas} \\ q &= h_{pwa}(T - T_{wi}) & \text{on } \Gamma_{pwa} \\ q &= h_{pwf}(T - T_{wo}) & \text{on } \Gamma_{pwf} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 각각의 경계는 Fig. 2 에 소개되어 있고 계수 h 와 주변부 온도는 온도측정과 함께 열전달 문헌을 참조하여 적절히 선정되었는데 식의 순서대로 값을 나열하면 h 는 3025, 12, 210, 270, 3248, 2539 $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 이며, 주변온도는 500, 30, 200, 42, 52 $^{\circ}$ 이다. 특히 위에서 수냉부 h 는 문헌 (5)를 활용하여 다음과 같이 계산한 후 경험에 의한 factor 를 곱하였다.

$$h_{pw} = \frac{0.079 \text{Re}_d^{0.75} \text{Pr}_w^{0.33} k_w}{2 d_{eq}} \quad (3)$$

여기서 d_{eq} 는 동등 직경으로서 부위에 따라 드릴

구멍의 직경 또는 수냉 채널간극의 2 배가 되며, 나머지는 모두 냉각수의 물성치이다. 유리와 Plunger 접촉부 Γ_{pk} 에서는 시점에 따라 다음과 같이 경계조건이 주어진다.

$$\begin{aligned} q &= h_{pg}(T_p - T_g) & \text{when } t \leq t_d \\ q &= h_{pa}(T - T_a) & \text{for Plunger} \\ q &= h_{ga}(T - T_a) & \text{for Glass} \end{aligned} \quad \text{when } t_d \leq t \leq t_c \quad (4)$$

여기서 h_{pg} 는 압입력, 도금, 금형 거칠기 등에 따른 함수로서 문헌 (6)에 의하면 접촉초기 매우 큰 $11,000 \text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 에서 3~4 초 사이에 $1,000 \text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 으로 급격히 감소하는 성질을 가지지만 본 해석에서는 이의 평균값 $3,500 \text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 를 사용한다. Plunger 및 유리의 물성치는 선형으로 가정하며, 밀도, 비열 및 열전도도가 각각 $7753, 2214 \text{kg}/\text{m}^3$, $599, 1123 \text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ 및 $28, 2.34 \text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 로 주어진다. 따라서 지배식은 열확산 방정식으로 기술된다. 한편 해석시작시의 Plunger 초기온도는 상온 또는 일정한 온도에서 시작하여 점차 수렴하도록 계산할 수도 있지만 Plunger 를 대상으로 Γ_{pk} 에 적절한 경계조건을 부과한 정상상태 해에서 출발하도록 하는 것이 수렴에 더 유리하다. 이를 위해 Γ_{pk} 에는 다음과 같이 정상상태 하의 동등 열전달계수를 지정하면 초기 해를 계산할 수 있다.

$$h_{pk0} = \frac{E_p E_x}{E_p + (1 - \frac{t_d}{t_c} E_x)} \frac{2 \sqrt{t_d}}{\sqrt{\pi} t_c} \quad (5)$$

여기서 $E_p = \sqrt{\rho_p c_p k_p}$ 로서 열관통치(Heat Penetration Value)라고도 한다. 계산결과 h_{pg0} 는 $932 \text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 로 주어진다. 이 공식은 Plunger 와 유리를 반 무한체로 가정, 초기에 서로 다른 온도로 유지되다가 t_d 초 동안 접촉 후 $t_c - t_d$ 초 동안 분리되었을 때의 1 차원 열전달 현상을 계산하고 이로부터 동등 h 를 유도한 것이다.

3. ANSYS 열해석

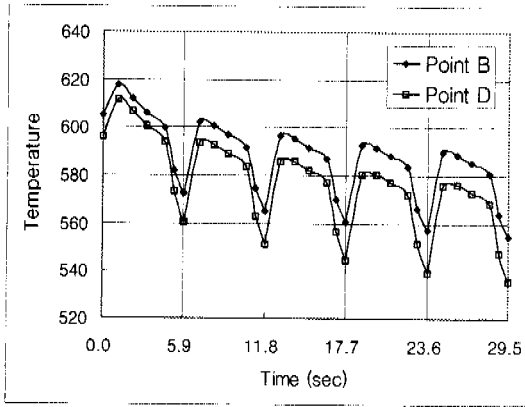


Fig. 3 Temperature history of initial 5 cycles of plunger

열전달 해석은 상용 소프트웨어 ANSYS 를 활용하여 계산하였으며, esize=5 로 하고 자동요소생성 기능을 활용하였다. Plunger 와 유리는 접촉과 분리를 반복하므로, 이를 위해 접촉부 Γ_{PK} 에 매우 얇은 층의 요소를 생성하고 이것을 살리거나 (EALIVE) 죽이는 (EKILL) 기능을 사용하였다. 시간간격은 ANSYS 의 추천에 따라⁽⁷⁾

$$\Delta t = \delta^2 / 4\alpha_p \quad (6)$$

으로 하였고, δ 는 최대 요소크기를, α 는 열확산계수이다. 본 문제의 경우 상기와 같은 시간간격에 ANSYS 해석을 해 보면 한 사이클에 7~8 회 의 스텝을 계산한다. 계산시간은 Pentium II 266MHz CPU, 128M RAM 의 컴퓨터로 세 사이클수행에 1 분이 소요되었다.

4. 지수함수 맞춤법

본 문제를 단순반복(Simple Repetition, SR)을 통해 해석하면 예를 들어 Fig. 3 에 보인 Plunger 외면의 중심 B 와 코너 D 점과 같이 매 사이클 마다 온도가 상승하강을 반복하면서 점차 어떤 패턴으로 도달하는 온도이력을 얻는다. Plunger 초기 조건을 각각 정상상태 및 균일한 300 도로 하여 열사이클 해석을 하고 매 사이클 끝 시점의 온도를 대상으로 점 B 및 D 를 사이클 횟수에 관해 플롯하면 Fig. 4 와 같이 매우 완만한 속도로 수렴하는 온도이력을 얻는다. 이것은 99 사이클까지만 해석한 결과로서 수렴 시 까지 매우 많은 사이클이 소요되며 변화의 완만함 때문에 수렴조건을 적절히 부과하기가 어려움을 알 수 있다. 한 예로서 수렴조건을 모든 절점

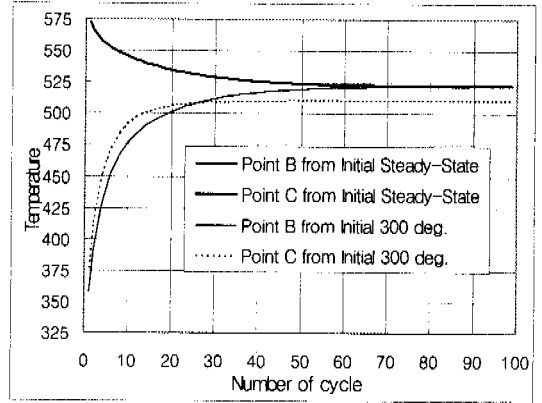


Fig. 4 Temperature history by simple repeated analysis of plunger

의 인접 사이클 간 온도차 1° 이내로 주고 해를 구하게 되면 불과 18 사이클 만에 해를 얻지만 이것은 아직 수렴 온도에 도달하기 훨씬 전의 해임을 Fig. 4 에서 알 수 있다. 즉 이때의 점 B 온도는 536° 로서 정확해 522.7° 와 큰 차이를 보인다. 이것을 수렴조건 0.1° 로 줄이면 522.8° 를 얻어 거의 근접한 해를 얻는다. 하지만 이를 위해 82 사이클이 소요되며, 다른 몇 경우에 대해 해석한 결과 합리적 수렴 해를 위해서는 대체로 80~90 사이클이 소요됨을 알 수 있다.

이런 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 금형 열이력이 미시적으로는 가열, 냉각이 반복되지만 거시적으로는 어떤 특정 커브를 형성하고 있는 점에 착안, Plunger 내 각 절점에서 연속된 3 사이클을 대상으로 매 사이클 종료 시점의 온도값 3 개를 구하고 이를 대상으로 커브 맞추기(curve fitting)를 한 후, 맞춤함수의 수렴값, 즉 맞춤함수의 무한 시간 후의 값에서 새로운 3 사이클을 진행하는 방법을 사용하였다. 이를 위해 3 가지 함수를 시도하였는데, 첫째는 집중열용량(Lumped-Heat-Capacity) 시스템에서 대류 열손실이 발생할 때 나타나는 거동⁽⁵⁾을 사용한 지수함수 맞춤(Exponential Function Fitting, EPF) 방법으로서 다음과 같이 정의하였다.

$$T = (T_i - T_\infty)e^{-\beta t} + T_\infty \quad (7)$$

다음 두 가지 방법은 오차함수(Error Function)을 사용하며, 반무한체의 표면 온도가 갑자기 변할 때의 거동⁽⁵⁾을 활용하는데, 이들을 각각 ERF1, ERF2 라 할 때 다음과 같다.

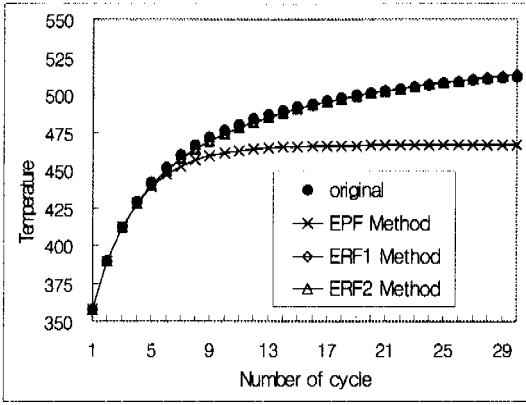


Fig. 5 Comparison of function fitting for monotonically increasing temperature

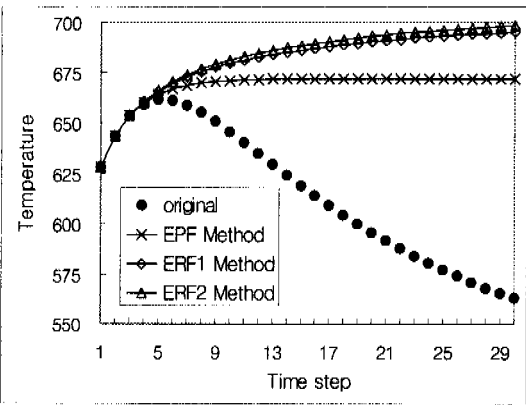


Fig. 6 Comparison of function fitting for concavely varying temperature

$$T = (T_i - T_\infty) \operatorname{erf} \left(\frac{\beta}{\sqrt{t}} \right) + T_\infty \quad \text{ERF1 method} \quad (8)$$

$$T = (T_i - T_\infty) \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{t + t_0}} \right) + T_\infty \quad \text{ERF2 method}$$

여기서 T_i, T_∞ 및 β 또는 T_i, T_∞ 및 t_0 가 각 경우에 맞춤을 통해 결정되어야 할 미지변수인데, 이들을 구하고 나면 새로운 사이클은 T_∞ 에서 재출발한다. 세 경우에 대해 입의의 두 온도이력을 대상으로 특성 비교를 하였다. Fig. 5는 온도가 지속 상승하는 경우로서 불과 3 온도 값만을 대상으로 맞췄음에도 불구하고 ERF1 과 ERF2 는 실제 온도이력에 매우 근접하는 탁월한 결과를 보였다. 반면에 Fig. 6 과 같은 구부러진 온도이력의 경우에는 당연한 결과이지만 세 방법 모두 실제와 다른 커브를 그렸으며, 오히려 ERF1, ERF2 는 발산의 조짐을 보

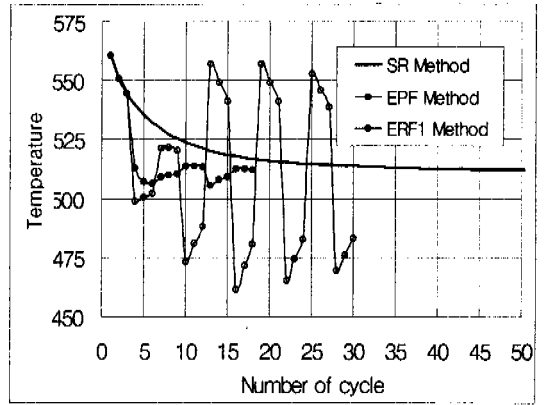


Fig. 7 Temperature history of point D in terms of number of cycles

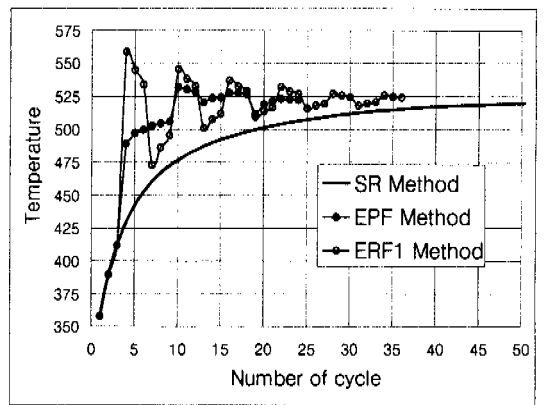


Fig. 8 Temperature history of point B in terms of number of cycles

이고 있어서 어느 방법이 더 탁월하다고 속단하기 어렵다.

상용 소프트웨어 ANSYS 를 본 방법과 함께 사용하기 위해 외부에서 Fortran 프로그램을 별도로 구성하고, ANSYS 3 사이클 해석결과를 이용, 함수맞춤을 반복하도록 하였다. 함수맞춤은 IMSL 최적화 라이브러리⁽⁸⁾에서 비제약 최적화의 하나인 준뉴턴 방법 DUMING 을 사용하였고 목적함수를 함수 값과 실제 온도 값간의 평균제곱근으로 하였다. 수렴 조건은 Plunger 내의 모든 절점에 대해 인접 사이클 간 온도차를 조사하여 최대차가 1° 이내이면 종료하도록 했는데, 이것은 단순반복시의 0.1° 내 수렴 조건과 거의 동일한 수준이다. Fig. 7은 초기 정상상태에서 출발한 점 D의 온도이력을, Fig. 8은 초기 300 도에서 출발한 점 B의 온도이력을 보이고 있는데, ERF1은 과도한 온도예측으로 인해 수렴하지 못하고 진동하거나 수렴하더라도 그 속도가 EPF에 비해 느리다. 따라서 EPF 방법이 가장 안정적이고

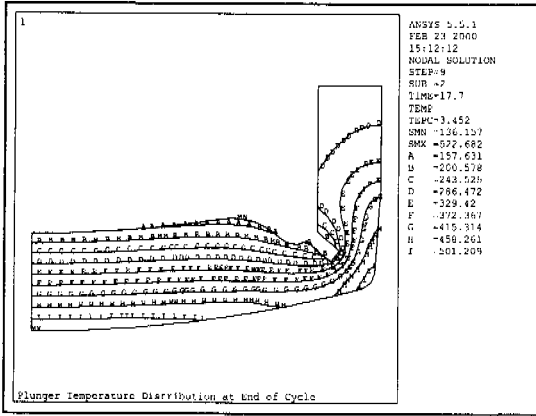


Fig. 9 Result of thermal cycle analysis for plunger

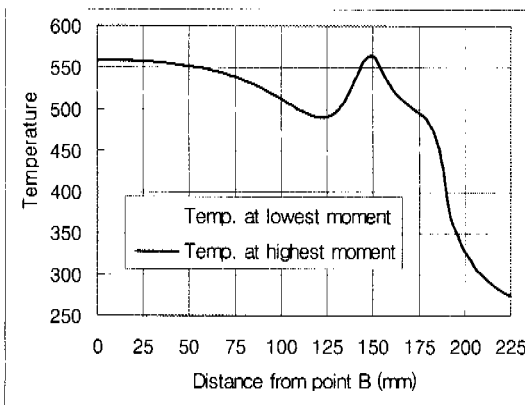


Fig. 10 Temperature distribution at the glass interface of plunger

효과적임을 알 수 있으며 이는 여러 예제를 통해 훌륭하게 입증되었는데 초기를 정상상태에서 출발하면 최소 6, 최대 18 사이클 내에서 항상 안정적으로 수렴하였다. 이 계산횟수는 단순 반복시의 약 90 회에 비해 7~20% 수준이다. 한편 ERF2 방법은 모든 경우에 수렴하지 못하여 제외되었다. EPF 방법의 또 하나의 장점은 지그재그식 수렴을 통해 이미 사이클 10 회 근방에서 참해 근방에 있음을 확실히 알 수 있으며, 따라서 정확도를 완화하여 조기 중단하면 계산시간을 더욱 절약할 수 있는 이점이 있다.

5. 적용 예제

본 방법을 사용하여 해석한 결과 마지막 사이클의 끝 시점에서의 대표적 온도분포를 Fig. 9 에, Plunger 의 유리 접촉면에서 최고 온도 및 최저 온도 시점에서의 온도커브를 Fig. 10 에 보였다.

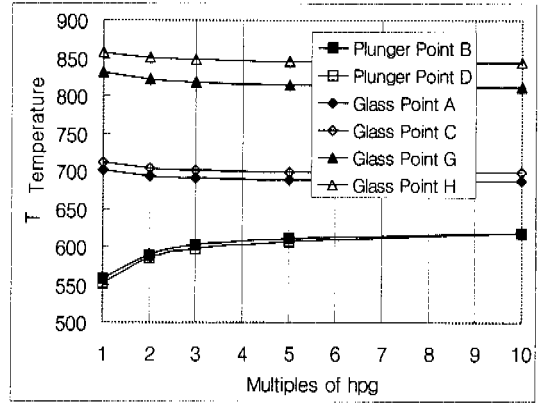


Fig. 11 Temperature variation of specific points with respect to hpg change

Plunger 는 최대 36 도의 진폭으로 증감되고 있음을 알 수 있다. 바람직한 방향은 Plunger 의 B-D 점간 표면에서 온도가 항상 500~550 도 이내에서 유지되고, 증감 폭은 되도록 작으며, B-D-F 표면에서의 온도분포는 되도록 굴곡 없이 균일한 감소가 되는 것이 좋다. 이를 위해서는 유리 두께 또는 외면 곡률이 달라지거나 공정조건이 달라지는 경우 온도분포에 어떤 영향을 미치는 지 조사하는 것이 필요하다. 이를 위해 몇 가지 변수변화에 따른 분석을 수행하였고 최종 사이클에서 Plunger 외면점 B, D 의 최대치, 유리 내표면 점 A, C 및 내부점 G, H (Fig. 2 참조)의 최소치를 주요 관심 값으로 하여 온도변화를 비교하였다.

5.1 Plunger, 유리간 접촉열전달계수 변화

Plunger 와 유리간 접촉열전달계수는 많은 공정변수가 내재된 데다가 시간에 따라 급속히 감소하는 특성이 있어 정확한 계수산정이 불가능하다. 따라서 역공학 관점에서 실측으로부터 정할 수 밖에 없으나 이 값의 변화에 따라 온도분포가 어떤 영향을 받는지를 조사하는 것은 매우 의미 있다. 이를 위해 h_{pg} 가 2, 3, 5 및 10 배로 증가한 경우에 대해 각각 해를 구한 결과를 Fig. 11 에 보였는데, 열접촉계수 증가로 인해 Plunger 와 유리 표면온도는 각각 40~50° 증가 및 15° 감소하며, Plunger 표면의 증감폭은 기존의 36 에서 50° 까지 벌어진다. 또한 h 증가에 따라 유리의 내부 점은 두께 얇은 부위의 G 가 두꺼운 코너 점 H 보다 더 크게 영향 받는다. 그러나 h 가 약 4-5 배 이상 되면 그 정도가 급격히 완화되며 실제 100 배 증가시킨 결과 약 4-5° 의 추가 변화만 있었다.

5.2 Plunger 냉각수 열전달계수 변화

본 경우에도 앞의 경우와 마찬가지로 h_{pw} 가 2, 3, 5 및 10 배로 증가한 경우를 분석해 보았다. 그 결과 Fig. 12 와 같이 Plunger, 유리 모두 표면온도가 감소하며, 또한 Plunger 표면의 최대, 최소간 온도차도 약 5° 증가한다. Plunger 센터부 보다 코너부 온도가 더 크게 영향 받는데, 이는 냉각드릴구멍 때문이다. 각 부위별로 온도를 비교해 보면 냉각능력 10 배 증가로 인해 Plunger 는 85° , 유리표면은 50° 감소하는데 반해 유리의 내부온도는 겨우 5° 만 감소, 유리내부의 냉각효과는 생각 보다 그리 크지 않다. 이는 유리의 낮은 열전도도로 인한 것으로 판단된다. 본 경우에도 앞과 유사하게 h 가 약 4~5 배 이후부터는 정도가 완화되며 그림으로 보이진 않았지만 100 배 증가시켜도 Plunger 는 겨우 5° 추가 냉각되며, 유리온도는 거의 불변한다.

5.2.1 유리두께의 변화

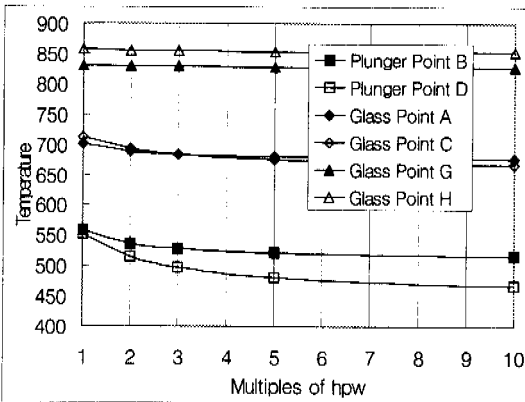


Fig. 12 Temperature variation of specific points with respect to hpw change

유리 두께가 5, 10, 15 및 20 mm로 변하는 경우에 대해 결과를 Fig. 13 에 보였는데, Plunger 는 별 온도 변화가 없는 반면 유리의 온도 증가가 두드러 진다. 또한 이 경우에도 온도의 증가추세가 완화되는 전환점이 존재하는데 약 12 mm 정도 이상이 되면 더 이상의 온도증가가 없다. 이로부터 유리가 두껍더라도 예상과 달리 Plunger 표면은 더 가열되지 않으며 유리 표면 온도 역시 일정두께 이상부터는 더 이상 크게 상승하지 않음을 알 수 있다. 이는 별도로 보이지는 않았지만 유리의 외면곡률을 거의 Flat 하게 하여 코너부위 두께가 매우 두껍게 한 경우의 결과에서도 잘 나타나는데 유리의 코너 내부점이 850 도에서 890 도로 상승하는 것 외에 온도 변화가 거의 없다.

5.3 Plunger 두께의 변화

Plunger center 의 두께가 41.5mm 에서 2/3 및 1/3 으로 감소할 경우를 분석해 보았다. 본 경우에는

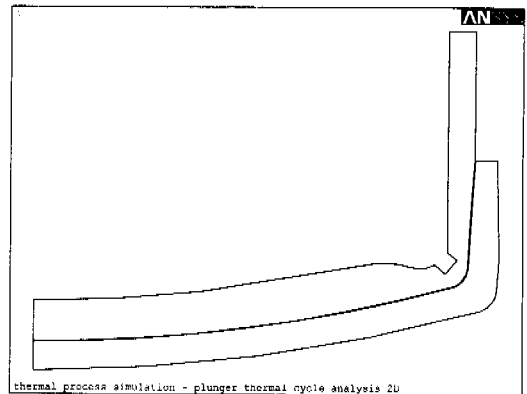


Fig. 14 Plunger with reduced thickness by 1/3

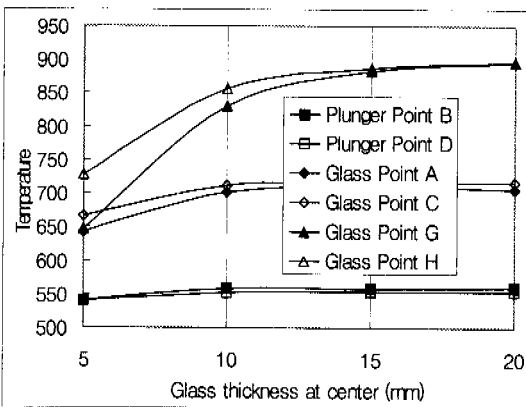


Fig. 13 Temperature variation of specific points with respect to glass thickness change

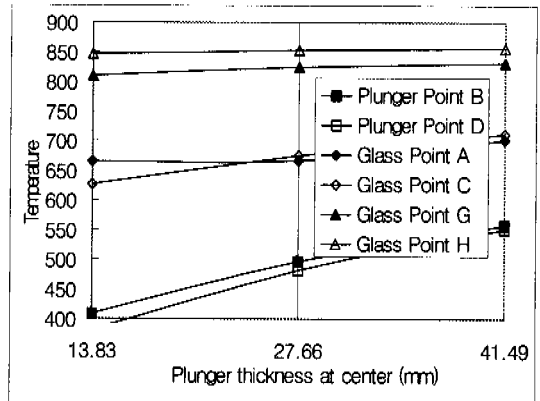


Fig. 15 Temperature variation of specific points with respect to plunger thickness change

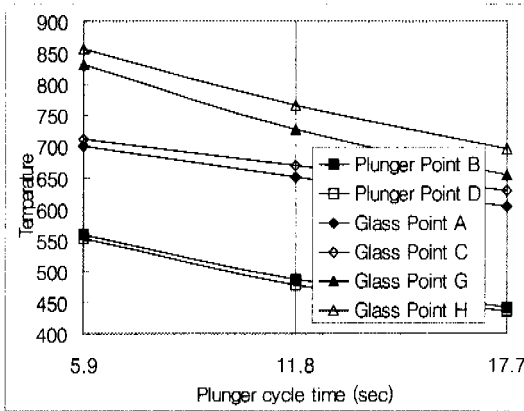


Fig. 16 Temperature variation of specific points with respect to cycle time change

Plunger center 뿐 아니라 우측 벽 두께와 함께 드릴의 깊이도 함께 감소하도록 하였으며, 참고로 1/3로 감소한 경우의 형상을 Fig. 14에 보였다. 각 경우에 대한 온도변화를 Fig. 15에 보였는데 역시 Plunger 두께가 얇아지더라도 유리의 냉각에는 별 효과가 없다.

5.4 사이클 시간의 변화

사이클 시간 t_c 가 5.9초에서 2배 및 3배 증가한 경우의 결과가 Fig. 16에 있다. 이때 접촉시간 t_d 는 일정한 비율로 유지된다. 본 경우는 앞의 모든 경우와 달리 시간을 증대함에 따라 유리의 표면 및 내부 냉각효과가 탁월하다. 이로부터 유리 냉각에 효과적인 방법은 사이클 시간의 절대적 증가 밖에 없음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 고온 반복 성형공정에 사용되는 금형의 열사이클 해석을 효과적으로 하는 방법을 개발하였다. 반복 공정의 특성상 금형은 매 사이클마다 온도상승과 하강을 반복하면서 어떤 정상상태에 도달하게 되는데, 이를 단순한 방법으로 해석할 경우 80~90 사이클의 계산이 필요하며 매우 느린 수렴속도로 인해 참해를 추정하기 어려운 점이 있었다. 본 연구에서는 지수함수로의 맞춤법을 적용하여 불과 6~18 회만의 해석으로 정확한 해를 구하였다. 이것은 본 문제의 경우 3 사이클 해석에 1분이 소요되므로 원래의 30분에서 2~6분으로의 계산

시간단축을 의미한다. 게다가 본 방법에서는 지그 재그 식의 접근을 통하여 진행되기 때문에 수렴 전에도 미리 참해가 어느 온도 영역 내에 있는지 알 수 있는 이점을 제공한다. 개발된 방법을 통해 TV 유리의 성형공정에 관한 몇 가지 변수의 변화 영향을 분석해 보았다. 그 결과 Plunger 냉각 효과를 키우거나 Plunger 금형 두께를 감소하더라도 유리 내부 냉각은 더 개선되지 않는다는 점, 유리두께가 증가하더라도 약 12mm 이상 부터는 금형 온도 변화가 별로 없다는 점, 그리고 유리내부의 냉각효과를 증대시키는 방법은 사이클 시간을 증가시키는 것 밖에 없다는 점을 발견하였다. 본 방법은 TV 유리 성형에 대해서 적용하였으나, 반복적으로 정상상태에 도달하는 다른 공정의 금형 열사이클 해석에도 적용이 가능하며, 특히 3차원 해석의 경우 계산시간 면에서 탁월한 효과를 발휘할 것으로 기대한다.

후기

본 연구의 일부는 삼성코닝㈜의 지원하에 이루어졌으며 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

- (1) McGraw, D. A., 1961, "Transfer of Heat in Glass During Forming," *Journal of The American Ceramic Society*, Vol. 44(7), pp. 353~363.
- (2) Manthuruthil, J., Sikri, T.R. and Simmons, G.A., 1974, "Simplified Mathematical Model Simulating Heat Transfer Glass-Forming Molds," *Journal of The American Ceramic Society*, Vol. 57(8), pp. 345~350.
- (3) Bonacina, C., Strada, M. and Gottardi, V., 1982, "Finite Element Analysis of the Temperature Fields in Glass Molds," *Glass Technology*, Vol. 23(4), pp. 172~176.
- (4) Davey, K. and Hinduja, S., 1990, "Modelling the Transient Thermal Behavior of the Pressure Die-Casting Process with the BEM," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 14, pp. 395~409.
- (5) Holman, J.P., 1976, *Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- (6) Fellows, C. J. and Shaw, F., 1978, "A Laboratory Investigation of Glass to Mould Heat Transfer During Pressing," *Glass Technology*, Vol. 19(1), pp. 4~9.
- (7) ANSYS Thermal Analysis Guide Release 5.5, 1998, SASI IP, Inc.
- (8) IMSL On-Line Pdf Documentation, 1997, Visual Numerics, Inc.