

TV 유리의 반복 성형공정에서 3차원 금형 열사이클 해석

황정해* · 최주호** · 김준범***

Three Dimensional Thermal Cycle Analysis of Mold in Repeated Forming Process of TV Glass

Junghea Hwang, Jooho Choi and Junbum Kim

Key Words : Repeated forming Process (반복성형공정), Thermal Cycle Analysis (열사이클 해석), Cyclic Steady State (반복적 정상상태), Exponential Curve Fitting (지수함수 맞춤)

Abstract

Three dimensional thermal cycle analysis of the plunger is carried out in repeated forming process of the TV glass, which is continued work of two dimensional analysis where an efficient method has been proposed. 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 90 cycles to get reasonable solution. An exponential function fitting method is proposed, 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. Number of cases are analyzed using the proposed method and compared to the result of straightforward repetition, from which one finds that the method always reaches nearly convergent solution within 9~12 cycles, but turns around afterwards without further convergence. Two step use is found most efficient, in which the exponential fitting is carried out for the first 12 cycles, followed by simple repetition, which shows fast convergence expending only 6 additional cycles to get the accuracy within 2 error. This reduces the computation cycle remarkably from 90 to 18, which is 80% reduction. From the parametric studies, one reveals that the overall thermal behavior of the plunger in terms of cooling parameters and time is similar to that of 2 dimensional analysis.

1. 서 론

본 연구는 TV 유리의 성형공정에서 용융유리를 반복적으로 압입, 성형하는 상부 금형(Plunger)에 대해 시간에 따른 온도분포 이력을 효과적으로 계산하기 위한 방법에 관한 연구이다. Plunger 금형은 TV 전면유리의 내면을 형성하는 중요한 금형으로서 유리가 압입, 성형 되고 나면 유리 내면은 더 이상의 후가공 없이 그대로 TV 나 모니터 등

의 화상을 형성하는 면이 된다. 따라서 Plunger 의 온도분포는 유리의 정확한 치수품질을 좌우하는 결정적 요인이 될 뿐 아니라 깨짐, 금형산화로 인한 자국 등 각종 외관불량과도 밀접한 관계가 있다. 특히 Plunger 의 대각 코너지점(diagonal corner area)에서는 열적 문제로 인한 각종 고질적 불량 이 집중 발생되어 이에 대한 근본적 해결이 절실한 문제가 되고 있다. 게다가 최근에는 평면화, 대형화하는 추세로 인해 성형되는 유리의 부피가 커지고 있음에도 불구하고, 이를 빠른 생산속도로 냉각시키는 문제가 대두되고 있는데 이 역시 Plunger 가 큰 역할을 담당하고 있다.

Plunger 는 유리의 압입성형 및 탈거를 반복적으로 행함에 따라 온도이력이 상승하강을 반복하는 과도(Transient) 열전달 특성을 가지며, 이러한 변화

* 한국항공대학교 항공기계공학과 대학원

** 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 삼성코닝㈜

는 어느 정도 사이클이 지나고 나면 동일 이력이 반복되는 반복적 정상상태(Cyclic Steady State)에 도달하게 된다. Plunger 의 바람직한 열적 설계를 하려면 이 상태에서의 온도분포와 이력을 규명해야 한다. 즉 Plunger, 유리 및 여타 금형 들의 조합을 대상으로 반복적 정상상태에 도달할 때 까지 과도 열전달 해석을 진행해야 하는데, 이는 한 사이클 끝의 온도분포를 다음 사이클 초기조건으로 하여 계산을 한 후 일정 온도 분포로 수렴할 때까지 반복하는 것이 된다. 이를 위해 실제 계산을 해보면 수렴속도가 매우 느려서 정상상태에 도달할 때 까지 적어도 90 회 이상의 매우 많은 사이클이 소요됨을 알게 된다. 이는 계산 효율 면에서 볼 때 2 차원은 물론이고 3 차원 해석의 경우 매우 심각한 문제가 된다. 본 연구의 핵심은 이러한 해석을 짧은 시간 내에 정확하게 수행하기 위한 효과적 방법을 구하는 것이다.

본 연구에서는 이를 위한 선행연구로서 해석대상을 Plunger 와 유리로 국한하고 2 차원 축대칭 문제로 단순화 하여 새로운 방법을 제시한 바 있다.⁽¹⁾ 이 방법은 금형 온도이력의 추세가 거시적으로 열전달 고유의 지수 또는 오차함수 거동을 보인다는 점에 착안, 매 3 사이클 계산결과를 가지고 온도이력을 적절한 함수로 맞추기(Fitting) 하고 이로부터 무한대 시간 후의 온도를 추정한 후 그것이 수렴할 때까지 반복하는 것이다. 이를 위해 지수함수(EPF, Exponential Function Fitting), 오차함수 I(ERF I, Error Function Fitting I), 오차함수 II(ERF II, Error Function Fitting II) 등 세가지 방법이 시도되었으며 이 중에서 EPF 방법이 가장 탁월한 수렴속도와 안정성을 보임을 발견하였다. 이 방법을 사용하면 기존의 약 90 회 이상 반복되는 해석을 최대 18 회만에 동일한 해를 얻을 수 있어 획기적 계산속도를 기대할 수 있다. 게다가 이 방법을 사용하면 사이클이 진행되면서 해의 상하한을 좁히면서 진행하기 때문에 참 해 영역을 조기에 알 수 있는 이점이 있다. 그러나 지금까지의 연구는 2 차원 축대칭 해석 결과로서 실제 문제에는 적용이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 3 차원 모델을 대상으로 함수맞춤법을 적용하고 정확성, 효율성 등을 검증하였다. 해석대상은 2 차원과 마찬가지로 Plunger 와 유리로 국한하였고 상용 소프트웨어 ANSYS 를 활용하여 열전도 해석을 하였으며, 지수함수 맞춤은 IMSL 최적화 라이브러리에 의한 최소자승 오차법으로 계산하였다. 또한 3 차원 모델의 복잡성으로 인해 CAD 소프트웨어 Unigraphics 를 활용하여 솔리드 모델을 생성한 후

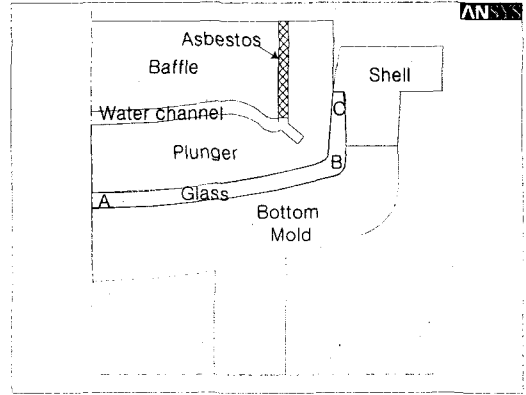


Fig. 1 Schematics of model assembly for TV glass

이를 IGES 파일로 변환하여 ANSYS 에서 활용하도록 하였다. 솔리드 모델의 생성은 Unigraphics 에서 제공하는 C++에 기반을 둔 API 함수를 이용하여 주요 설계변수만 입력하면 자동으로 생성되도록 하였다.

2. TV 유리 성형공정의 열해석 모델

TV 유리의 성형은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 하부 금형(Bottom Mold), 측면 금형(Shell) 및 상부 금형(Plunger)으로 이뤄진 공간을 용융유리가 채우게 된다. 유리는 이전 위치에서 하부에 투입되며 압입 위치에 오면 Plunger 가 하강, 압입하여 성형한다. 압입 위치에 오면 압입은 순식간에 이뤄지고 이후 냉각을 위해 일정 시간 접촉상태를 유지하며, Plunger 상승 후 냉각된 유리는 하부금형과 함께 다음 위치로 이동하고 다시 새로운 유리 와 금형이 들어 오는 것이 반복된다. Plunger 는 유리 냉각을 위해 내부에 냉각수 채널을 갖고 있으며, Fig. 1 에서와 같이 유리 구석부 B 지점 냉각을 높이기 위해 드릴 구멍이 있고 다리 지점 C 는 과냉방지를 위해 내면에 단열재를 부착하고 있다. 본 연구에서는 해석 모델을 Fig. 2 와 같이 Plunger 와 유리에 대해 3 차원 모델을 생성하여 해석한다. Plunger 및 유리의 중심부의 두께를 각각 42, 10mm 로 정할 때, 나머지 형상 관련치수는 그림을 통해 유추할 수 있다. 유리의 금형 접촉부를 포함, 냉각수 채널, 단열부 등 모든 경계는 상수 계수를 가진 대류경계조건으로 가정한다. 한 사이클 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 도달하는

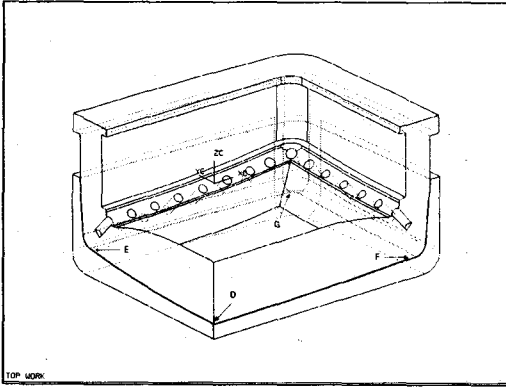


Fig. 2 Thermal analysis 3D model of plunger

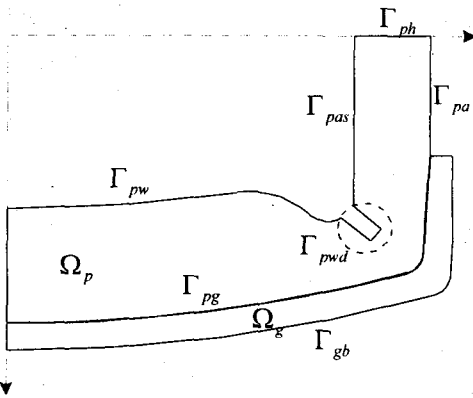


Fig. 3 Thermal analysis model of plunger

데, 유리는 항상 일정한 초기 온도에서 출발하는 반면, Plunger 는 첫번째 사이클에만 주어지고, 다음부터는 초기 온도가 전 사이클 종료시 온도가 된다. 유리의 초기온도는 850 °C 에서 출발한다. 본 논문에서 사용하는 온도 단위는 °C 이다. 유리와 Plunger 외곽에 적용되는 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 q &= h_{gb} (T - T_b) & \text{on } \Gamma_{gb} \\
 q &= h_{pa} (T - T_a) & \text{on } \Gamma_{pa} \\
 q &= h_{ph} (T - T_h) & \text{on } \Gamma_{ph} \\
 q &= h_{pas} (T - T_{wi}) & \text{on } \Gamma_{pas} \\
 q &= h_{pwd} (T - T_{wi}) & \text{on } \Gamma_{pwd} \\
 q &= h_{pw} (T - T_{wo}) & \text{on } \Gamma_{pw}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 각각의 경계는 Fig. 3 에 2 차원으로 소개되

어 있고 h_{gb} , h_{pa} , h_{ph} , h_{pas} , h_{pwd} 및 h_{pw} 는 각각 유리와 하부금형의 접촉면에서의 열전달계수, Plunger 의 공기 접촉면에서의 열전달계수, Plunger 의 Head 부에서의 열전달계수, Plunger 의 석면패치 부에서의 열전달계수, Plunger 의 Drill 부에서의 열전달계수 및 Plunger 의 나머지부분에서의 열전달계수이다. 열전달계수 h 와 주변부 온도는 온도측정과 함께 열전달 문헌을 참조하여 적절히 선정되었는데 식의 순서대로 값을 나열하면 h 는 1246, 13, 210, 270, 2400, 1200 $W/m^2 \cdot K$ 이며 주변부 온도는 500, 30, 200, 42, 52 이다. 또한 Plunger 와 유리 접촉부 Γ_{pg} 에서의 접촉열전달계수 h_{pg} 는 1246 $W/m^2 \cdot K$ 이다. 각각의 h 의 선정자료는 참고문헌 (1) 을 참조하기 바란다. Plunger 및 유리의 물성치는 선형으로 가정하며, 밀도, 비열 및 열전도도가 각각 7700, 2799 kg/m^3 , 462, 1050 $J/kg \cdot ^\circ C$ 및 29.9, 1.75 $W/m \cdot ^\circ C$ 로 주어진다. 한편 해석 시작시의 Plunger 초기 온도는 상온 또는 일정한 온도에서 시작하여 점차 수렴하도록 계산할 수도 있지만 Plunger 를 대상으로 Γ_{pg} 에는 정상상태 하의 동등 열전달계수를 지정하여 초기해를 계산 하면 수렴속도를 빠르게 할 수 있다. 이것 역시 문헌 (1) 을 참조하기 바란다. 본 문제의 경우 초기 정상상태 하의 접촉열전달계수 h_{pg0} 를 607.457 $W/m^2 \cdot K$ 로 하였다.

3. ANSYS 열해석

실제 해석은 상용 소프트웨어 ANSYS 를 활용하여 계산하였으며, esize=7 로 하고 자동요소생성 기능을 활용하였다. Plunger 와 유리는 접촉과 분리를 반복하므로, 이를 위해 접촉부 Γ_{pg} 에 0.5mm 정도의 얇은 층의 요소를 생성하고 이것을 살리거나 (EALIVE) 죽이는(EKILL)기능을 사용하였다. 시간 간격은 ANSYS 추천에 따라

$$\Delta t = \delta / 4\alpha \quad (2)$$

으로 하였다. 여기서 δ 는 최대 요소 크기를, α 는 열확산계수이다. 본 문제의 경우 상기와 같은 시간간격에서 ANSYS 해석을 수행해 보면 한 사이클에 5 번의 행렬방정식을 풀게 된다. 계산시간은 Athlon 800MHZ CPU, RAM 512MB 의 컴퓨터로 1 사 이클 해석에 10 분이 수행되었다.

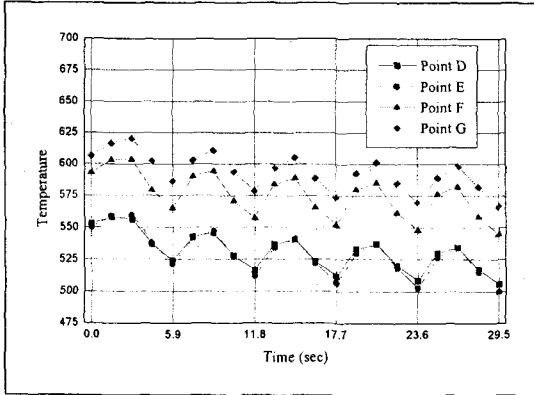


Fig. 4 Temperature history of initial 5 cycles of plunger

4. 지수함수 맞춤법

본 예제를 단순반복(Simple repetition, SR)을 통해 해석하면 예를 들어 Plunger 외면의 중심점과 minor, major, diagonal 축상에 있는 점 D, E, F 및 G의 경우 Fig. 4 와 같이 매 사이클 마다 온도 상승 하강을 반복하면서 점차 어떤 패턴으로 도달하는 온도 이력을 얻는다. Plunger 초기 조건을 각각 정상 상태 및 균일한 300 도로 하여 열사이클 해석을 하고 매 사이클 끝 시점의 온도를 대상으로 점 D, E, F 및 G를 사이클 횟수에 관해 플롯하면 Fig. 5 와 같이 매우 완만한 속도로 수렴하는 온도 이력을 얻는다. 이것은 99 사이클까지만 해석한 결과로서 수렴 시 까지 매우 많은 사이클이 소요되며 변화의 완만함 때문에 수렴조건을 적절히 부과하기가 어려움을 알 수 있다. 만일 수렴 조건을 모든 절점의 인접 사이클 간 온도차 1° 이내로 준다면 불과 16 사이클 만에 해를 얻을 수 있지만 점 D, E, F 및 G의 온도는 각각 490.75, 487.145, 528.974 및 553.486 $^{\circ}\text{C}$ 로서 최종해의 결과 476.698, 481.582, 521.109 및 548.657 $^{\circ}\text{C}$ 와 최대 14°C 의 큰 차이를 보인다. 따라서 정확한 해를 구하기 위해서는 인접 사이클간 온도차를 0.01°C 로 해야 하며 이는 92 사이클이 되어야 얻게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 금형의 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 커브맞추기(curve fitting)를 한 후, 맞춤함수의 수렴값, 즉 맞춤함수의 무한 시간 후의 값에서 새로운 3 사이클을 진행하는 방법을

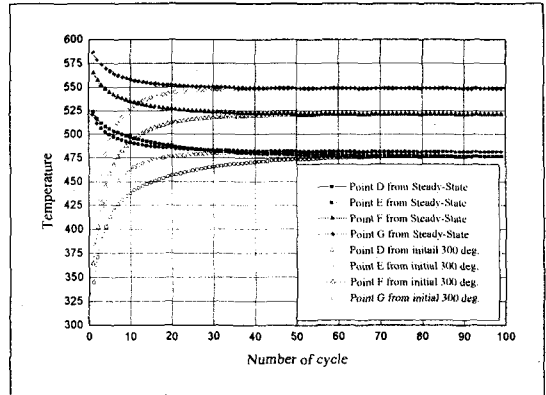


Fig. 5 Temperature history by simple repeated analysis of plunger

사용하였다. 이를 위해 3 가지 함수를 시도하였는데, 첫째는 집중열용량(Lumped-Heat-Capacity)시스템에서 대류 열손실이 발생할 때 나타나는 거동 (6) 을 사용한 지수함수 맞춤(Exponential Function Fitting, EPF)방법으로서 다음과 같이 정의 하였다.

$$T = (T_i - T_{\infty})e^{-\beta t} + T_{\infty} \quad (3)$$

다음의 두 가지 방법은 오차함수(Error Function)를 사용하며, 반무한체의 표면의 온도가 갑자기 변할 때의 거동 (6) 을 활용하는데, 이들을 각각 ERF1, ERF2 라 할 때 다음과 같다.

$$T = (T_i - T_{\infty})\text{erf}\left(\frac{\beta}{\sqrt{t}}\right) + T_{\infty} \quad \text{ERF1 method} \quad (4)$$

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

여기서 T_i, T_{∞} 및 β 또는 T_i, T_{∞} 및 t_0 가 각 경우에서 맞춤을 통해 결정되어야 할 미지 변수들인데, 이들을 구하고 나면 새로운 사이클은 T_{∞} 에서 재출발한다. 상용 소프트웨어 ANSYS 를 본 방법과 함께 사용하기 위해 외부에서 Fortran 프로그램을 별도로 구성하고, ANSYS 3 사이클 해석결과를 이용, 함수 맞춤을 반복하도록 하였다. 함수맞춤은 IMSL 최적화 라이브러리에서 비제약 최적화의 하나인 준뉴턴방법 DUMING 을 사용하였고 목적함수를 함수 값과 실제 온도 값간의 평균제곱근으로 하였다. 수렴조건은 Plunger 내의 모든 절점에 대

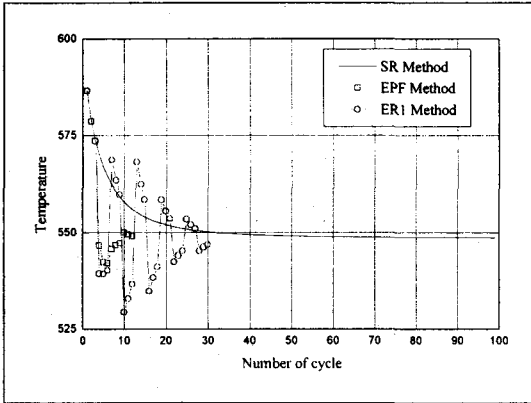


Fig. 6 Temperature history point G in terms of number of cycles

해 인접 사이클간 온도차를 조사하여 최대차가 1°C 이내이면 종료하도록 했는데, 이것은 단순반복시의 0.01° 내의 수렴 조건과 거의 동일한 수준이다. Fig. 6은 초기 정상상태에서 출발한 점 G의 온도이력을 보이고 있는데 ERF1은 과도한 예측으로 인해 수렴하더라도 그 속도가 EPF에 비해 느리다. 따라서 EPF 방법이 가장 안정적이고 효과적임을 알 수 있다. 한편 ERF2는 모든 경우에서 수렴하지 못해서 제외시켰다. 그런데 단순히 EPF 방법만 사용하여 모든 절점에 대해 인접 사이클간 온도차 1° 이내로 수렴 조건을 부가하게 되면 대부분의 경우에 30 사이클이상 수행해도 수렴 조건을 만족하지 못한다. 따라서 초기 12 사이클에서는 EPF 방법을 사용하고 그 이후 사이클부터 단순반복으로 계산하게 되면 추가 6 사이클만에 수렴조건을 0.01°C 하여 단순반복만으로 계산한 결과와 Plunger의 모든 절점에서 온도 차이가 ±2°C 이내가 된다. 그 중 관심점의 온도를 Table.1에 보였다. 이 계산횟수는 단순반복시의 약 90 회에 비해 20%수준이다.

Table. 1 Comparison of results

Method \ Point	Only SR Method (conv.=0.01°C)	EPF +6 TH SR Method	ΔT
D	476.763	476.756	0.007
E	481.632	481.545	0.087
F	520.632	520.843	-0.211
G	549.087	548.611	0.477

5. 적용예제

본 방법을 사용하여 해석한 결과 마지막 사이클

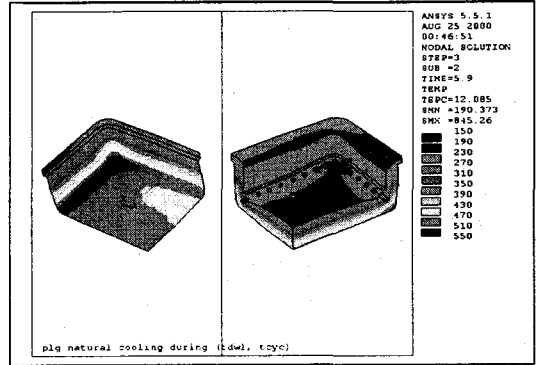


Fig. 7 Result of thermal cycle analysis for plunger

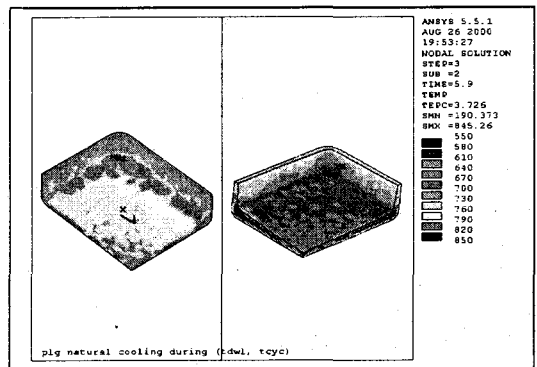


Fig. 8 Result of thermal cycle analysis for glass

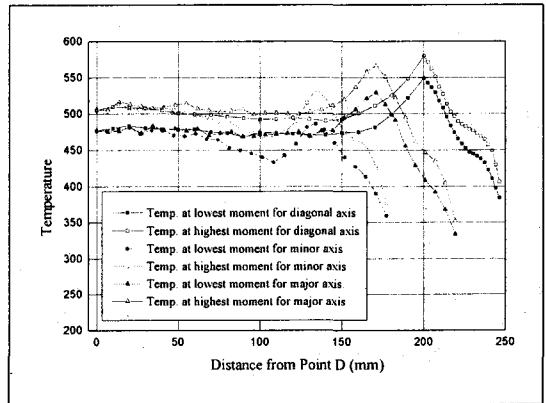


Fig. 9 Temperature distribution at the glass interface of plunger

끝 시점에서 대표적 온도분포를 Fig. 7, Fig 8에 Plunger의 유리 접촉면에서 최고온도 및 최저 온도 시점에서의 온도크보를 Fig. 9에 보였다. Plunger는 최대 37.97°C의 진폭으로 증감되고 있음을 알 수 있다. 바람직한 방향은 Plunger의 유리와 접촉되는 표면에서 온도가 항상 500-550도 이내에서 유지되고, 증감폭은 되도록 작으며, 중심

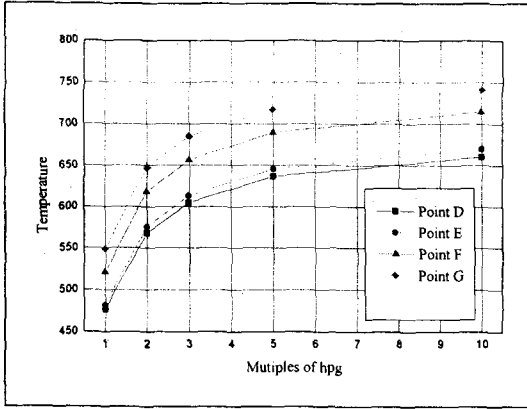


Fig. 10 Temperature variation of specific points with respect to hpg change

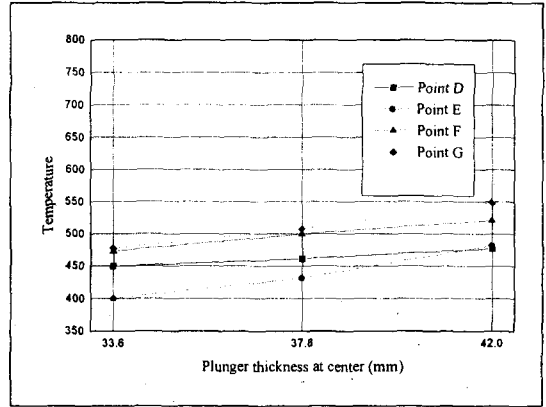


Fig. 12 Temperature variation of specific points with respect to plunger thickness change

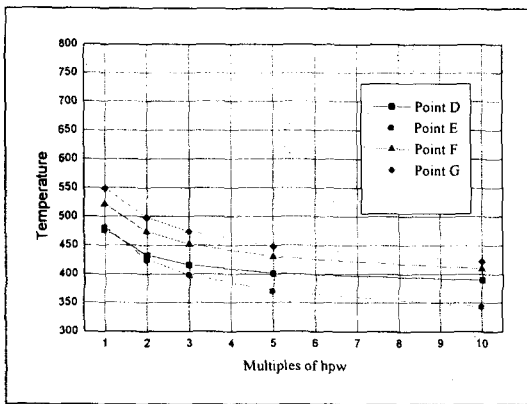


Fig. 11 Temperature variation of specific points with respect to hpw change

에서 각 minor, major 및 diagonal 코너를 지나 측면까지의 온도 분포는 되도록 굴곡 없이 균일하게 감소가 되는 것이 좋다. 이를 위해서는 Plunger의 두께 또는 공정조건이 달라지는 경우 온도분포에 어떤 영향을 미치는지 조사하는 것이 필요하다. 이를 위해 몇 가지 변수변화에 따른 분석을 수행하였고 최종 사이클에서 Plunger 외표면점 D, E, F 및 G를 주요 관심 값으로 하여 온도변화를 비교하였다.

5.1 Plunger, 유리간 접촉열전달계수 변화

Plunger와 유리간 접촉열전달계수는 많은 공정 변수가 내재된 데다가 시간에 따라 급속히 감소하는 특성이 있어 정확한 계수산정이 불가능하다. 따라서 열공학적인 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 경

우에 대해 각각 해를 구한 결과를 Fig. 10에 보였는데, 접촉열전달계수가 증가하면 Plunger의 온도는 증가하고 Plunger 표면의 증감폭은 37.97에서 54.74°C까지 벌어진다. 그리고 h_{pg} 의 증가에 따른 Plunger 표면의 온도증가는 점차 감소하고 있는데 이는 2차원 문제의 결과와 유사한 경향을 보이는 하지만 온도 증가량은 2차원 문제의 약 3배로서 큰 차이를 보이고 있다.

5.2 Plunger 냉각수 열전달계수 변화

본 경우에도 앞의 경우와 마찬가지로 h_{pw} 가 2, 3, 5 및 10 배 증가한 경우를 분석해 보았다. 그 결과 Fig. 11과 같이 Plunger 표면두께 감소에 따른 Plunger 표면의 온도 감소는 점차 감소하고 있다. 그리고 Plunger 표면의 증감폭은 기존의 37.97에서 48.19°C까지 벌어진다. 이 경우 역시 h_{pw} 가 증가함에 따라 온도는 감소하나 감소량이 2차원 문제에 비해 약 2배정도 크다.

5.3 Plunger 두께의 변화

Plunger center의 두께가 42mm에서 0.9 및 0.8으로 감소할 경우를 분석해 보았다. 본 경우에는 Plunger center뿐만 아니라 측면벽 두께와 함께 드릴 깊이도 함께 같은 비율로 감소하도록 하였다. 각 경우에 대한 온도 변화를 Fig. 12에 보였는데 Plunger 두께가 얇아지면 Plunger 온도가 감소하는데 Plunger 중심점 D에서 1mm 감소마다 3.4°C 정도 감소하고 Plunger의 diagonal 축상의 점 G에서 1mm 감소마다 8.7°C 정도 감소한다. 이는 2차원 문제에서 각각 4.6 및 5.1°C 정도 감소하는 것과는 수치적으로 큰 차이를 보인다. 그리고 Plunger 표면의 증감폭은 37.97에서 59.14°C까지 벌어진다.

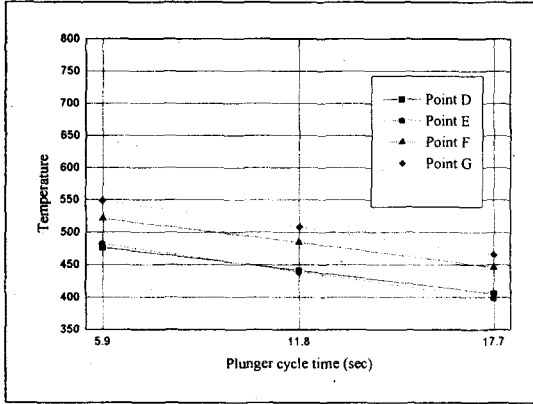


Fig. 13 Temperature variation of specific points with respect to cycle time change

5.4 사이클 시간의 변화

사이클 시간 t_c 가 5.9 초에서 2 배 및 3 배 증가한 경우의 결과가 Fig. 13에 있다. 이 때 접촉시간 t_d 는 t_c 가 증가됨에 따라 일정한 비율로 유지된다. 사이클 시간이 증가함에 따라 Plunger 온도가 감소한다. 2 차원 문제의 결과와 비교하면 유사한 경향을 보이기는 하지만 사이클 시간 t_c 가 2 배 및 3 배 증가에 따른 Plunger의 중심점 D의 각 단계별 온도 감소량은 2 차원 문제에서 71.7 및 45.7 °C 임에 반해 3 차원 문제에서는 35.9 및 35.4 °C로 수치적 값은 큰 차이를 보이고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 고온 반복 성형공정에 사용되는 3 차원 금형의 열사이클 해석을 효과적으로 하는 방법을 개발하였다. 반복 공정의 특성상 금형은 매 사이클마다 온도상승과 하강을 반복하면서 어떤 정상상태에 도달하게 되는데, 이를 단순반복 방법으로 해석할 경우 90 사이클이상의 계산이 필요하며 매우 느린 수렴속도로 인해 참해를 추정하기 어려운 점이 있었다. 본 연구에서는 매 3 사이클마다 지수함수로서의 맞춤법을 적용하였다. 하지만 parameter study 수행하던 중 지수함수 맞춤법만을 사용하면 9~12 사이클 내에 수렴조건을 0.01 °C 로한 정확한 해와 어느 정도까지 근접하기는 하지만 더 이상 지수함수 맞춤법을 사용해도 해에 수렴하지 않는 문제점이 있었다. 따라서 초기 12 사이클은 매 3 사이클마다 지수함수 맞춤법을 사용하고 그 이후 6 사이클을 단순반복방법을 사용하면 수렴조건을 0.01 °C 해석 결과와의 온도

차이는 모든 절점 내에서 불과 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내가 된다. 게다가 우리가 관심을 가지고 있는 Plunger와 유리의 접촉면에서 온도차이는 이보다도 더 적은 0.5°C 이내로서 매우 정확한 값을 보였다. 본 문제의 경우 1 사이클 해석에 10 분이 소요되므로 원래의 900 분 이상에서 180 분으로의 계산시간 단축을 의미한다. 개발된 방법을 통해 TV 유리의 성형공정에 관한 몇 가지 변수의 변화 영향을 분석해 보았다. 그 결과 수냉부의 냉각효과를 키우거나 Plunger 금형 두께를 감소시키거나 사이클 시간을 증가시키면 Plunger의 유리 접촉면에서의 온도를 낮출 수 있다는 점을 알 수 있었다. 이는 2 차원 문제의 해석결과와 비슷한 경향을 보이기는 하지만 세부적 수치에서는 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 2 차원 문제의 해석결과는 경향 파악에는 도움이 될 수 있겠지만 실제문제 적용에는 한계가 있음을 알 수 있다. 본 방법은 TV 유리성형에 대해서 적용하였으나, 반복적으로 정상상태에 도달하는 다른 공정의 금형 열사이클 해석에도 적용이 가능하며, 특히 모델의 크기가 커질 경우 계산시간 면에서 탁월한 효과를 발휘할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) 최주호, 김준범, 황정해, 하덕식, 2000, "TV 유리의 반복성형공정에서 금형 열사이클 해석을 위한 효과적 방법," 대한기계학회 논문집 B 권 제 24 권 제 9 호 게재예정.
- (2) McGraw, D. A., 1961, "Transfer of Heat in Glass During Forming," Journal of The American Ceramic Society, Vol. 44(7), pp. 353~363.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Holman, J.P., 1976, Heat Transfer, McGraw-Hill.
- (7) 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.
- (8) ANSYS Thermal Analysis Guide Release 5.5, 1998, SASI IP, Inc.
- (9) IMSL On-Line Pdf Documentation, 1997, Visual Numerics, Inc.