

# 반복 성형공정에서 금형 열사이클 해석을 위한 효과적인 방법 및 TV 유리 공정에서의 적용

최주호\* · 김준범\*\* · 황정해\* · 하덕식\*\*

## An Efficient Method for Mold Thermal Cycle Analysis in Repeated Forming Process and its Application to TV Glass Process

Joocho Choi, Junbum Kim, Junghea Hwang, 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 mold thermal cycle analysis in repeated forming process, which is well suited to the analysis in TV glass production. Plunger, which is a mold to press-form the glass, undergoes temperature fluctuation during a cycle due to the repeated contact and separation from the glass, which attains a cyclic steady state in the end. If analyzed straightforwardly of this problem, it leads to more than 80 cycles to get reasonable solution, and it is yet hard to setup stopping criteria due to extremely slow convergence. An exponential fitting method is proposed to solve the problem, where an exponential function is found to best approximate temperature values of 3 consecutive cycles, and new cycle is restarted with the function value at infinite time. From numerical implementation, it is found that the method reduces the number of cycles dramatically to only 6~15 cycles to reach accurate solution within 1° error. 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.

### 1. 서론

본 연구는 TV 유리 성형공정에서의 효과적인 금형 열사이클 해석방법을 제시하고 이를 통해 금형 온도분포 개선과 성형품의 열적 품질향상을 꾀하는데 있다. 성형공정에서 금형은 고온재료의 투입, 압입성형 및 탈거를 반복적으로 행함에 따라 온도 이력이 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 온도

분포와 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.

본 연구에서 제시하는 방법은 금형 온도이력의 추세가 거시적으로 지수함수 거동을 보인다는 점에 착안, 매 3 사이클 계산결과를 가지고 온도이력을 지수함수로 맞추기(Fitting)하고 이로부터 무한

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 삼성코닝㈜

대 시간후의 온도를 추정한 후 그것이 수렴할 때까지 반복하는 것이다. 이 방법은 수렴속도가 획기적으로 개선될 뿐 아니라 해의 상하한을 좁히면서 진행하기 때문에 참 해 영역을 조기에 알수 있는 잇점이 있다. 본 연구의 응용예로 TV 유리 성형용 상부 금형인 Plunger 성형공정에서의 열전달 해석을 실시, 매우 빠른 해를 얻었으며, 이를 토대로 몇가지 조건에 대한 Parameter Study를 행하였다. 본 연구는 2차원 축대칭 해석에만 국한하였고, 상용 소프트웨어 ANSYS를 활용하여 열전도 해석을 하였으며, 지수함수 맞춤은 IMSL 최적화 라이브러리에 의한 최소자승오차법으로 계산하였다.

## 2. TV 유리 성형공정의 열해석 모델

TV 유리의 성형은 Fig.1에서 보는 바와 같이 하부 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 Plunger가 하강, 압입하여 성형한다. 압입은 순식간에 이뤄지고 이후 냉각을 위해 일정 시간 접촉상태를 유지하며, Plunger 상승후 냉각된 유리는 하부금형과 함께 다음 위치로 이동하고 다시 새로운 유리와 금형이 들어 오는 것이 반복된다.

Plunger는 유리 냉각을 위해 내부에 냉각수 채널을 갖고 있으며, Fig.1에서와 같이 유리 구석부 C지점 냉각을 높이기 위해 드릴구멍이 있고 다리 지점 E는 과냉방지를 위해 내면에 석면을 부착하고 있다. 본 연구에서는 Plunger가 관심대상이므로 해석 모델은 Fig.2와 같이 Plunger와 유리로 국한하며 2차원 축대칭 문제로 단순화한다. Plunger 및 유리의 중심부 두께를 각각 42, 10mm로 정할 때, 나머지 형상 관련 치수는 그림을 통해 유추할 수 있다. 유리의 금형 접촉부를 포함, 냉각수 채널, 석면부착부 등 모든 경계는 상수 계수를 가진 대류경계조건으로 가정한다. 한 사이클을  $t_c$  초, Plunger의 유리접촉시간을  $t_d$  초라 할 때, Plunger  $\Omega_p$ 와 유리  $\Omega_g$ 는 각각 접촉과 분리를 반복하면서 점차 반복적 정상상태에 도달하는데, 유리는 항상 일정한 초기 온도에서 출발하는 반면, Plunger는 첫 사이클에만 주어지고, 다음부터는 초기 온도가 전 사이클 종료시의 온도가 된다. 따라서 임의의 사이클에서 초기조건은

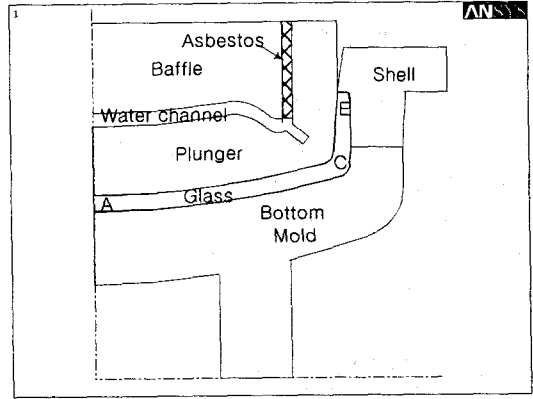


Fig. 1 TV 유리 성형용 금형 개략도

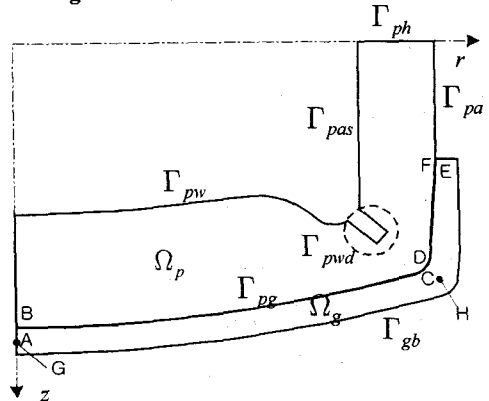


Fig. 2 Plunger 열사이클 해석모델

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

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

여기서  $\bar{T}_g, \bar{T}_p, T_{pf}$ 는 각각 유리, Plunger 초기온도 (통상 900도 및 500도로 지정) 및 바로 전 사이클 끝의 Plunger 온도이다. 유리와 Plunger 외곽에 적용되는 경계조건은 다음과 같다.

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

여기서 각각의 경계는 Fig.2에 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  $W/m^2K$ 이며, 주변온도는 500, 30, 200, 42,  $52^\circ$ 이다. 특히 위에서 수냉부  $h$ 는 문헌 (1)를 활용하여 다음과 같이 계산한 후 경험에 의한 factor를 곱하였다.

$$h_{pw} = \frac{0.079 Re_d^{0.75} Pr_w^{0.33} k_w}{2 d_{eq}} \quad (3)$$

여기서  $d_{eq}$ 는 동등 직경으로서 부위에 따라 드릴 구멍의 직경 또는 수냉 채널간극의 2배가 되며, 나머지는 모두 냉각수의 물성치이다. 유리와 Plunger 접촉부  $\Gamma_{pg}$ 에서는 싯점에 따라 다음과 같이 경계조건이 주어진다.

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

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

$$h_{pg0} = \frac{E_p E_g}{E_p + (1 - \frac{t_d}{t_c} E_g)} \frac{2 \sqrt{t_d}}{\sqrt{\pi} t_c} \quad (5)$$

여기서  $E_p = \sqrt{\rho_p c_p k_p}$ 로서 열관통치(Heat Penetration Value)라고도 한다. 계산결과  $h_{pg0}$ 는  $932 W/m^2K$ 로 주어진다. 이 공식은 Plunger와 유리를 반무한체로 가정, 초기에 서로 다른 온도에 있다가  $t_d$ 동안 접촉후  $t_c - t_d$ 동안 분리되었을때의 1차원 열전달 현상을 계산하고 이로부터 동등  $h$ 를 유도한 것이다.

### 3. ANSYS 열해석

실제 해석은 상용 소프트웨어 ANSYS를 활용하여 계산하였으며,  $esize=5$ 로 하고 자동요소생성 기능을 활용하였다. Plunger와 유리는 접촉과 분리를 반복하므로, 이를 위해 접촉부  $\Gamma_{pg}$ 에 매우 얇은 층의 요소를 생성하고 이것을 살리거나 (EALIVE) 죽이는 (EKILL) 기능을 사용하였다. 시간간격은 ANSYS의 추천에 따라<sup>(3)</sup>

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

으로 하였고,  $\delta$ 는 최대 요소크기를,  $\alpha$ 는 열확산 계수이다. 본 문제의 경우 상기와 같은 시간간격에서 ANSYS 해석을 해 보면 한 사이클에 7~8회의 Iteration을 수행한다. 계산시간은 Pentium II 266MHz CPU, 128M RAM의 컴퓨터로 세 사이클 수행에 1분이 소요되었다.

### 4. 지수함수 맞춤법

본 문제를 단순반복(Simple Repetition, SR)을 통해 해석하면 예를 들어 Plunger 외면의 중심 B와 코너 D 경우 Fig.3과 같이 매 사이클 마다 온도 상승하강을 반복하면서 점차 어떤 패턴으로 도달하는 온도이력을 얻는다. Plunger 초기 조건을 각각 정상상태 및 균일한  $300$ 도로 하여 열사이클 해석을 하고 매 사이클 끝 싯점의 온도를 대상으로 점 B 및 D를 사이클 횟수에 관해 플롯하면 Fig.4와 같이 매우 완만한 속도로 수렴하는 온도이력을 얻는다. 이것은 99 사이클까지만 해석한 결과로서 수렴시 까지 매우 많은 사이클이 소요되

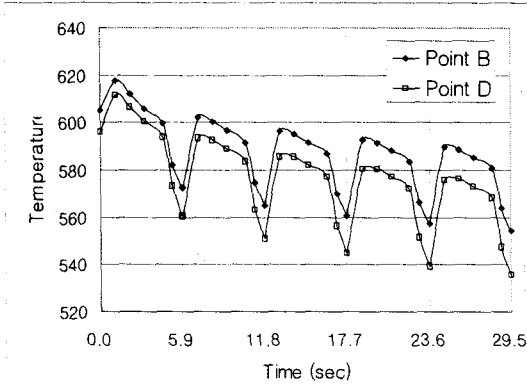


Fig. 5 Plunger 초기 5 사이클 온도이력

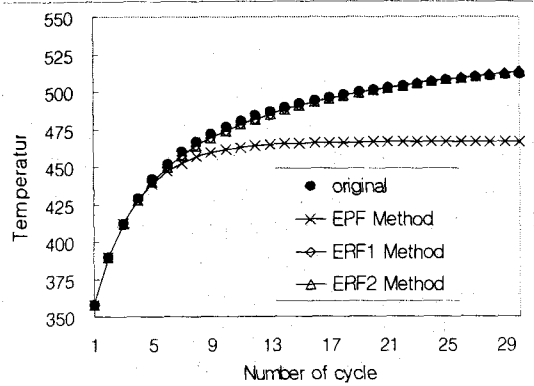


Fig. 3 단조상승 온도이력의 함수맞춤 비교

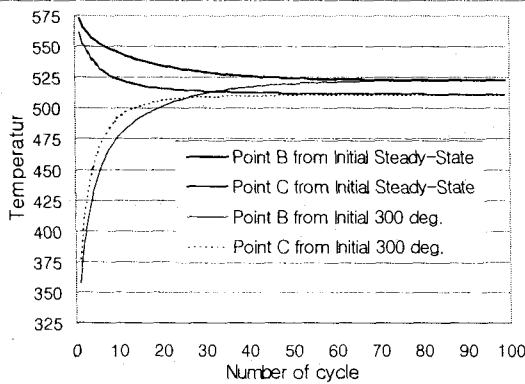


Fig. 4 단순반복해석 의한 Plunger 온도이력

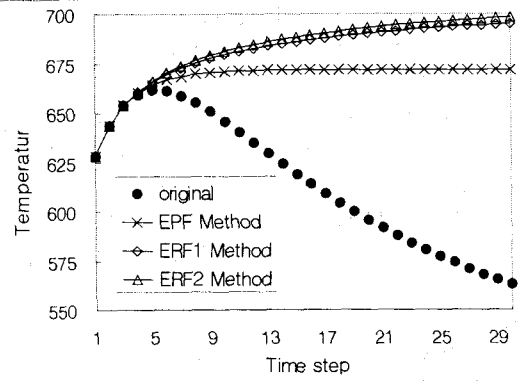


Fig. 6 구부러진 온도이력의 함수맞춤 비교

며 변화의 완만함 때문에 수렴조건을 적절히 부과하기가 어려움에 알수 있다. 만일 수렴조건을 모든 절점의 인접 사이클 간 온도차  $1^\circ$  이내로 준다면 불과 18 사이클만에 해를 얻지만 이때 점 B 온도는  $536^\circ$ 로서 실제해  $522.7^\circ$ 와 큰 차이를 보인다. 이것을 수렴조건  $0.1^\circ$ 로 줄이면  $522.8^\circ$ 를 얻어 거의 근접하지만 이를 위해 82 사이클이 소요되며, 약 90 사이클이 넘어서야 비로소 참해에 도달한다.

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 3개를 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 대류열손실이 발생할 때 나타나는 거동<sup>(1)</sup>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 두가지 방법은 오차함수(Error Function)을 사용하며, 반무한체의 표면 온도가 갑자기 변할때의 거동<sup>(1)</sup>을 활용하는데, 이들을 각각 ERF1, ERF2 라 할 때 다음과 같다.

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

$$T = (T_i - T_\infty) \operatorname{erf} \left( \frac{1}{\sqrt{t + t_0}} \right) + T_\infty \quad \text{ERF2 method} \quad (8)$$

여기서  $T_i, T_\infty$  및  $\beta$  또는  $T_i, T_\infty$  및  $t_0$  가 각 경우에  
서 맞춤을 통해 결정되어야 할 미지변수들인데,  
이들을 구하고 나면 새로운 사이클은  $T_\infty$  에서 재  
출발한다. 세 경우에 대해 임의의 두 온도이력을  
대상으로 특성 비교를 하였다. Fig.5는 온도가 지  
속상승하는 경우로서 불과 3 온도값만을 대상으로  
맞춤했음에도 불구하고 ERF1 과 ERF2는 실제 온  
도이력에 매우 근접하는 탁월한 결과를 보였다.  
반면에 Fig.6 과 같은 구부러진 온도이력의 경우  
에는 당연한 결과이지만 세 방법 모두 실제와 다른  
커브를 그렸으며, 오히려 ERF1, ERF2는 발산의  
조짐을 보이고 있어서 어느 방법이 더 탁월하다고  
속단하기 어렵다.

상용 소프트웨어 ANSYS를 본 방법과 함께 사  
용하기 위해 외부에서 Fortran 프로그램을 별도로  
구성하고, ANSYS 3 사이클 해석결과를 이용, 함수  
맞춤을 반복하도록 하였다. 함수맞춤은 IMSL 최  
적화 라이브러리<sup>(4)</sup>에서 비제약 최적화의 하나인  
준뉴턴 방법 DUMING을 사용하였고 목적함수를  
함수값과 실제 온도값간의 평균제곱근으로 하였다.  
수렴조건은 Plunger 내의 모든 절점에 대해 인접  
사이클 간 온도차를 조사하여 최대차가  $1^\circ$  이내이  
면 종료하도록 했는데, 이것은 단순반복시의  $0.1^\circ$   
내 수렴조건과 거의 동일한 수준이다. Fig.7은 초  
기 정상상태에서 출발한 점 D의 온도이력을 보이  
고 있는데, ERF1은 과도한 온도예측으로 인해 수  
렴하지 못하고 진동하거나 수렴하더라도 그 속도  
가 EPF에 비해 느리다. 따라서 EPF 방법이 가장  
안정적이고 효과적임을 알 수 있으며 이는 여러  
예제를 통해 훌륭하게 입증되었는데 초기를 정상  
상태에서 출발하면 최소 6, 최대 15 사이클 내에서  
항상 안정적으로 수렴하였다. 이 계산횟수는 단순

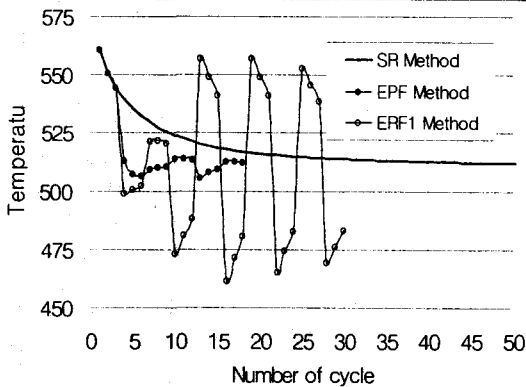


Fig. 7 사이클 증가에 따른 점 D의 온도이력

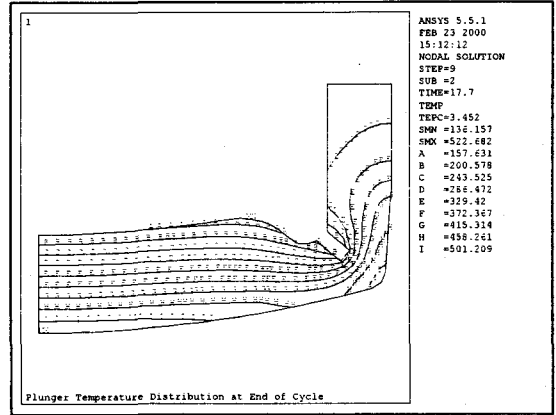


Fig. 9 Plunger 열사이클 해석결과 온도분포

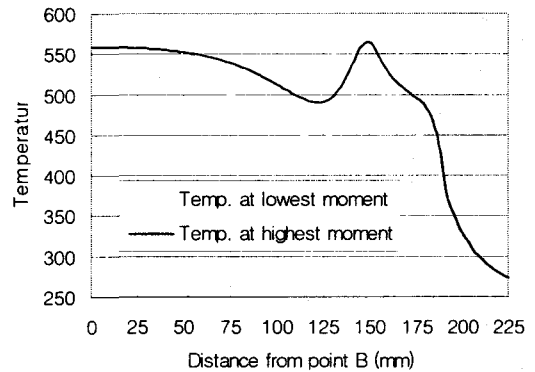


Fig. 8 Plunger 표면 온도커브

반복시의 약 90 회에 비해 7~17% 수준이다. 한편  
ERF2 방법은 모든 경우에 수렴하지 못하여 제외  
되었다. EPF 방법의 또하나의 장점은 지그재그식  
수렴을 통해 이미 사이클 10 회 근방에서 참해 근  
방에 있음을 확실히 알 수 있으며, 따라서 정확도  
를 완화하여 조기 중단하면 계산시간을 더욱 절약  
할 수 있는 잇점이 있다.

## 5. 적용 예제

본 방법을 사용하여 해석한 결과 마지막 사이클의  
끝짓점에서의 대표적 온도분포를 Fig.8에, Plunger  
의 유리접촉면에서 최고 온도 및 최저 온도 지점  
에서의 온도커브를 Fig.9에 보였다. Plunger는 최  
대 36도의 진폭으로 증감되고 있음을 알 수 있다.  
바람직한 방향은 Plunger의 B-D점간 표면에서  
온도가 항상 500~550도 이내에서 유지되고, 증감  
폭은 되도록 작으며, B-D-F 표면에서의 온도분포  
는 되도록 굴곡없이 균일한 감소가 되는 것이 좋

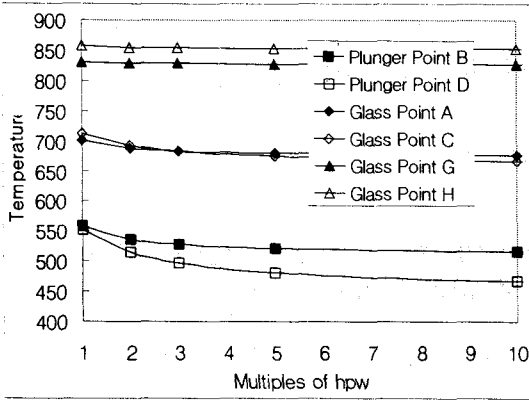


Fig. 10 hpw 변화에 따른 주요지점 온도변화

다. 이를 위해서는 유리 두께 또는 외면 곡률이 달라지거나 공정조건이 달라지는 경우 온도분포에 어떤 영향을 미치는 지 조사하는 것이 필요하다. 이를 위해 몇가지 변수변화에 따른 분석을 수행하였고 최종 사이클에서 Plunger 외면점 B, D의 최대치, 유리 내표면점 A, C 및 내부점 G, H (Fig.2 참조)의 최소치를 주요 관심값으로 하여 온도변화를 비교하였다.

### 5.1 Plunger 냉각수 열전달계수 변화

$h_{pw}$ 가 2, 3, 5 및 10 배로 증가한 경우를 분석해 보았다. 그 결과 Fig.10 과 같이 Plunger, 유리 모두 표면온도가 감소하며, 또한 Plunger 표면의 최대, 최소간 온도차도 약  $5^\circ$  증가한다. Plunger 센터부 보다 코너부 온도가 더 크게 영향받는데, 이는 냉각드릴구멍 때문이다. 코너점 D, C 및 H를 비교해 보면 냉각능력 10 배 증가로 인해 Plunger는  $85^\circ$ , 유리표면은  $50^\circ$  감소하는데 반해 내부온도

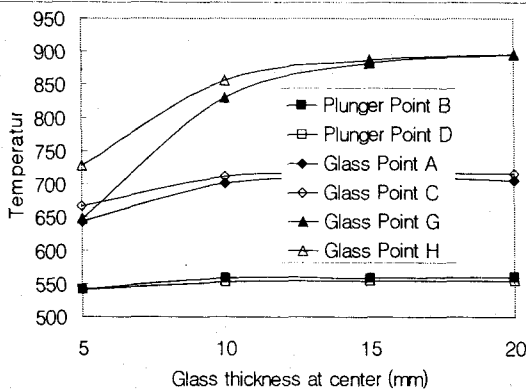


Fig. 11 유리두께 변화에 따른 온도변화

는 겨우  $5^\circ$ 만 감소, 냉각효과 증대에 비해 큰 효과가 없다. 본 경우에도 앞과 유사하게  $h$ 가 약 4~5 배 이후 부터는 정도가 완화되며 그림으로 보 이진 않았지만 100 배 증가하면 Plunger  $5^\circ$  추가냉각, 유리온도는 거의 불변한다.

### 5.2 유리두께의 변화

유리 두께가 5, 10, 15 및 20 mm로 변하는 경우에 대해 결과를 Fig.11 에 보였는데, Plunger 는 별 온도변화가 없는 반면 유리의 온도 증가가 두드러진다. 또한 이 경우에도 온도의 증가추세가 꺾어지는 전환점이 존재하며 약 12 mm 정도 이상이 되면 온도증가가 거의 없음을 알수 있다. 이로부터 유리가 두껍더라도 Plunger 온도는 별로 상승하지 않으며 유리 표면 온도 역시 크게 상승하지는 않음을 알수 있다. 이는 별도로 보이지는 않았지만 유리의 외면곡률을 거의 Flat 하게 하여 코너부위 두께가 매우 두껍게 한 경우의 결과에서도 잘 나타나는데 유리의 코너 내부점이  $850^\circ$ 에서  $890^\circ$ 로 상승하는 것외에 다른 부위의 온도는 거의 변화가 없다.

## 6. 결론

본 연구에서는 고온 반복 성형공정에 사용되는 금형의 열사이클 해석을 효과적으로 하는 방법을 개발하였는데 지수함수 맞춤법을 적용하여 불과 6~15 회만의 해석으로 정확한 해를 구하였다. 개발된 방법을 통해 TV 유리의 성형공정에 관한 몇 가지 변수의 변화 영향을 분석해 보았다. 그 결과 냉각효과나 유리두께가 공정변화에 큰 영향을 주지 못한다는 사실을 알게 되었다.

### 후 기

본 연구의 일부는 삼성코닝(주)의 지원하에 이루어졌으며 이에 감사하는 바이다.

### 참고문헌

- (1) Holman, J.P., 1976, Heat Transfer, McGraw-Hill.
- (2) 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.
- (3) ANSYS Thermal Analysis Guide Release 5.5, 1998, SASI IP, Inc.
- (4) IMSL On-Line Pdf Documentation, 1997, Visual Numerics, Inc.