

최적화 기법과 분산 컴퓨팅을 이용한 재료 성형공정의 역문제에 관한 연구

최주호 † · 오동길* · 하덕식** · 김준범**

(2003 년 12 월 14 일 접수, 2004 년 3 월 13 일 심사완료)

A Study on Inverse Problem of Materials Forming Process using Optimization Technique and Distributed Computing

JooHo Choi, DongGil Oh, DukSik Ha and JunBum Kim

Key Words : Inverse Problem (역문제), Glass Forming Process (유리성형공정), Heat Transfer Coefficient (열전달계수), Periodic State (주기적 상태), Distributed Computing (분산 컴퓨팅)

Abstract

In this paper, an inverse problem of glass forming process is studied to determine a number of unknown heat transfer coefficients which are imposed as boundary conditions. An analysis program for transient heat conduction of axi-symmetric dimension is developed to simulate the forming and cooling process. The analysis is repeated until it attains periodic state, which requires at least 30 cycles of iteration. Measurements are made for the temperatures at several available time and positions of glass and moulds in operation. Heat removal by the cooling water from the plunger is also recorded. An optimization problem is formulated to determine heat transfer coefficients which minimize the difference between the measured data and analysis results. Significant time savings are achieved in finite difference based sensitivity computation during the optimization by employing distributed computing technique. The analysis results by the optimum heat transfer coefficients are found to agree well with the measured data.

1. 서 론

본 연구는 고열을 수반하는 재료의 성형공정에서 발생하는 열전달 해석문제에서 적정 경계조건을 찾는 방법에 관한 것이다. 일반적으로 이러한 문제를 역문제(inverse problem)라 하는데, 본 연구에서는 이를 효과적으로 해결하는 방법을 제시하였으며, 적용사례로 유리의 프레스 성형 냉각 공정을 다루었다. 프레스 성형공정은 곱(gob)이라 부르는 고온의 용융유리 덩어리를 하부 금형에 떨어뜨려 상부 금형으로 압입성형한 후 냉각 공기를 분사하는 강제공냉을 수 차례 가하여 냉각하고,

이를 다음 공정으로 넘기는 과정으로 구성된다. 여기에 사용되는 상부와 하부 금형은 고온 유리로 인한 과열을 방지하기 위해 금형 내·외부에 각각 수냉과 공냉장치를 가지고 냉각시키고 있다. 이들 금형은 유리의 투입, 프레스 및 냉각 과정이 반복적으로 이뤄짐에 따라 초기 가동 후 어느 정도 사이클이 지나고 나면 열 평형에 도달하면서 동일한 온도이력이 반복되는 상태가 되며, 이때부터 정상 제품이 생산되게 된다. 성형냉각공정의 열전달 해석은 이러한 금형과 유리를 대상으로 각종 냉각조건 하에서 온도분포 및 이력을 열전달 이론을 활용하여 계산하는 것이다.

유리의 성형공정에서 고품질 유리를 만들기 위해서는 정확한 치수와 흠집없는 외관이 요구되는데, 이를 위해서는 유리가 균일한 온도분포를 유지하면서 적절한 속도로 냉각되어야 한다. 이러한 유리의 품질은 유리와 직접 접촉하는 상부, 하부 금형과 함께 각종 공정변수가 영향을 주고 있다.

† 책임저자, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
E-mail : jhchoi@mail.hau.ac.kr
TEL : (02)300-0117 FAX : (02) 3158-4429

* 프리즘㈜

** 삼성코닝㈜

금형의 경우 표면의 온도분포가 매우 중요한데, 균일한 온도분포와 적정 온도의 유지가 필요하며, 이를 위해 적절한 금형 냉각설계가 뒤따라야 한다. 공정변수의 경우 압입성형이나 공냉시간 등 각종 시간변수와 함께 수냉 및 공냉 유량 등이 중요한 요소이며, 이들이 금형설계와 함께 복합적으로 작용하면서 유리의 품질에 큰 영향을 미친다. 유리의 고품질 생산을 구현하기 위해서는 이와 같이 많은 변수들에 대해 과학적 분석을 수행하고 이를 토대로 공정 개선을 하는 것이 합리적이다. 그러나 과거에는 유리의 열전달 관련 물성치가 불확실하여 과학적 분석이 어려울 뿐 아니라 공정의 특성상 실험적으로도 규명하기가 어려운 점이 있었다. 이로 인해 공정의 개선은 거의 경험에 의존하여 이뤄졌고, 따라서 개선의 효과가 있을 수 밖에 없었다. 최근에는 각종 열전달 관련 계측과 컴퓨터를 이용한 CAE 기술이 비약적으로 발전함에 따라 이러한 기술을 활용한 공정 개선이 가능한 시점에 이르렀다.

열전달 측면에서 볼 때 해석결과로 얻는 온도 분포와 이력은 각종 냉각이나 접촉부위에 부여되는 경계조건에 의해 좌우되며 이들은 대부분 열전달계수 h 를 통해 표현된다. 따라서 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 부위별로 정확한 h 를 부여해야 한다. 그러나 이들은 몇몇 간단한 경우를 제외하고는 대부분 그 값이 잘 알려져 있지 않다. 일부에서는 이들의 정확한 계산을 위해 주변 냉각수나 공기의 난류유동을 해석하거나, 접촉 열전달 현상의 실험적 분석을 시도하고 있으나 아직 그 결과를 신뢰하지 못하고 있다. 따라서 현재까지는 간단한 공식이나 몇 가지 경험에만 의존하여 직관적으로 값을 부여하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 최근에는 실제 공정이나 실험에서 측정이 가능한 특정 부위에 대해 온도나 열량을 측정하고, 해석 결과와의 비교를 통하여 미지의 경계조건 변수를 역으로 추정하는 역문제(inverse problem)가 많이 연구되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 역문제는 미지 경계조건 변수가 어떤 형태로 정의되느냐에 따라 함수추정(function estimation)과 매개변수추정(parameter estimation)의 두 가지로 구분된다. 역문제의 일반적인 특징은 추정된 함수가 측정된 온도의 오차에 매우 민감하게 변화하는 나쁜 특성(ill-posedness)을 가지거나 추정된 변수가 온도에 대해 큰 비선형성을 가진다는 점이다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 공정해석의 경계조건에 활용되는 각종 열전달계수 h 를 유한개의 미지 상수화하여 이를 추정하였으므로 매개변수 추정에 해당한

다. 매개변수 추정을 위해 통상 활용되는 방법은 최소자승방법(least squares method)이며 온도 측정치와 계산치 간의 오차자승 합을 최소화하기 위한 h 를 찾는 최적화 문제가 된다. 역문제의 해를 구하기 위한 일반적인 방법은 회귀분석법인데, 이는 문제의 특성상 측정오차가 존재하며 이를 고려하려면 통계적 분석이 수반되어야 하기 때문에 추정된다.⁽⁴⁾ 한편 지금까지의 역문제 연구는 주로 계산기법이나 이론적 타당성 측면의 연구가 많았던 반면 실제 생산 열공정에 적용을 시도한 연구는 단조 공정에서의 열전달 계수를 결정하는 몇몇 연구를 제외하고는 별로 발견되지 않고 있다.^(5,6)

본 연구에서는 유리의 프레스 생산 공정을 대상으로 미지의 열전달 계수를 결정하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 현장에서 측정이 가능한 시점과 부위에 대해 온도 측정을 실시하였다. 또한 수냉되고 있는 금형 냉각수의 유입, 유출 온도 측정을 통해 탈열 에너지를 계산하여 역문제에 활용하였다. 이를 토대로 열전달 계수를 결정하는 최적화 문제를 구성하였고, 목적함수는 통상의 역문제에서와 같이 측정온도와 해석결과와의 오차 자승합을, 제한조건은 금형 수냉부의 탈열 에너지가 측정값과 같아야 한다는 조건을 고려하였다. 해를 구하는 방법은 회귀분석법 대신 최적화 소프트웨어 Visual DOC⁽⁷⁾를 사용하였으며 순차적 선형계획법 알고리즘을 이용하였다. 민감도의 계산을 위해 설계변수를 미소량 증가시켜 계산하는 유한차분법을 활용하였으며, 이때 발생하는 많은 반복계산을 효율적으로 수행하기 위해 분산처리용 소프트웨어 EnFuzion⁽⁸⁾을 이용하여 여러 대의 컴퓨터에 분산처리를 하였다. 열전달 해석을 위해서는 상용 해석 소프트웨어 ANSYS⁽⁹⁾를 활용하였다. 완성된 최적화 프로그램을 이용하여 유리성형공정의 2차원 축 대칭 문제를 대상으로 최적 열전달계수를 구하였다. 그 결과 열전달 계수를 문헌이나 경험으로 추정하였던 초기 조건의 경우 측정치와의 온도편차가 최대 155도이었으나, 최적화 결과 최대 19도로 감소하여 실제 공정의 열전달 현상을 매우 정확하게 표현하였다.

2. 프레스 성형공정 해석

유리의 성형냉각 공정은 Fig.1에서 보는 바와 같이 대형 원반 테이블의 원주에 일정 간격으로 배치된 하부금형(mould)이 두 위치씩 회전과 정지를 반복하면서 고온의 용융유리 투입, 상부금형(plunger)에 의한 압입성형 및 수 차례의 강제 공

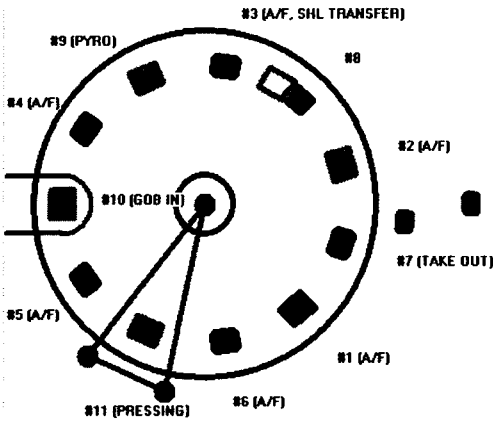


Fig. 1 Glass forming process

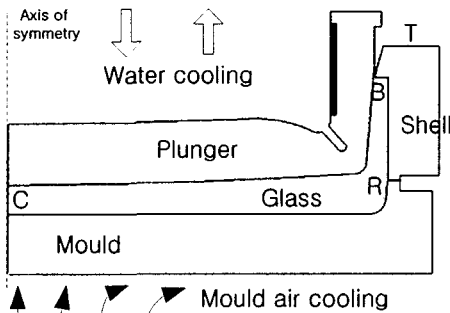


Fig. 2 Section view at pressing position

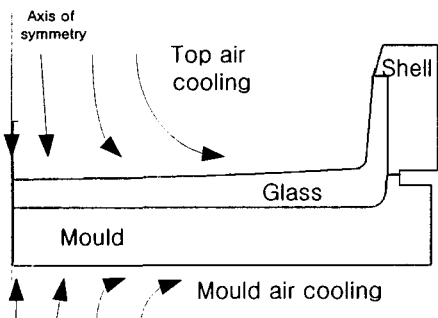


Fig. 3 Section view at air cooling position

냉을 진행한 후 탈거 위치에서 다음 공정으로 넘기는 방식으로 진행된다. Fig. 2 는 Fig. 1 의 압입 위치 #11 에서 금형과 유리 결합상태의 반 단면도이며, Fig. 3 은 이후의 위치에서 유리가 강제 공냉되는 상황을 보이고 있다. 한편 측면금형(shell)은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 #3 위치에서 벗겨져 유리 탈거 이후의 #8 위치로 이동함으로써 #7 위치에서의 탈거를 가능하게 한다. 따라서 원반 테이블에는 11 개의 몰드, 6 개의 셸, 및 1 개의 플런저가 사용되고 있다. 플런저는 유리의 반복 압입

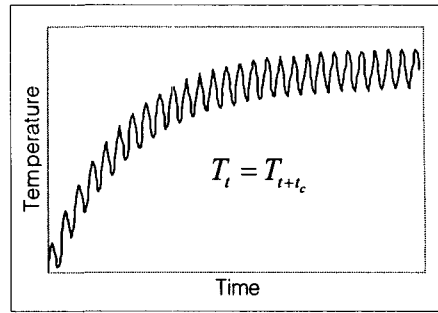


Fig. 4 Temperature history of periodic process

으로 인한 과열을 방지하기 위해 내면에 냉각수를 순환시키고 있으며, 모서리 부위 R 부 과열을 막기 위해 구멍을 내어 냉각 효과를 높이는 반면, B 부의 과열을 막기 위해 적절한 단열장치를 부착한다. 몰드가 한 위치에서 다음 위치로 이동하기 까지 시간을 t_c 라 할 때 플런저는 이 시간 동안 유리압입 및 분리를 매번 반복하며, 어느 정도 사이클이 지나면 고온유리의 열 공급과 냉각수의 탈열이 평형에 이르면서 Fig. 4 와 같이 온도이력이 동일하게 반복되는 주기적 상태(periodic state)가 된다. 이러한 현상은 몰드와 셸에도 동일하게 적용되는 데, 몰드의 경우 사이클 시간은 $11t_c$ 가 된다.

본 연구에서는 몰드가 원반 테이블을 한 회전하는 동안 금형, 유리의 온도이력과 분포를 계산하는 열전달 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 해석을 위한 지배방정식은 과도(transient) 열전달 방정식으로서, 각 금형과 유리에 대해

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \tag{1}$$

로 주어지며, 이때 밀도 ρ 와 열전도도 κ 는 온도에 따라 변하는 함수로 고려하였다. 유리의 초기온도는 금형에 투입할 때의 실제 온도를 측정하여 부여한 반면, 각 금형의 초기 온도는 적정 균일 온도로 가정하였다. 해석을 진행하는 동안 금형과 유리는 위치에 따라 접촉 또는 분리를 하게 되는데 접촉 시에는 동등 접촉 열전달계수를 정의하여 다음과 같은 조건을 부여하였다.

$$q = h_{mg}(T_m - T_g) \tag{2}$$

여기서 q 는 열속을, T_m 와 T_g 는 각각 해당 금형과 유리의 접촉면 온도를, h_{mg} 는 동등 열전달계수를 의미한다. 문헌에 의하면 h_{mg} 는 시간에 따라 급격히 감소하는 경향을 가지지만⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 상수로 고려하였다. 금형과 유리에 부여되

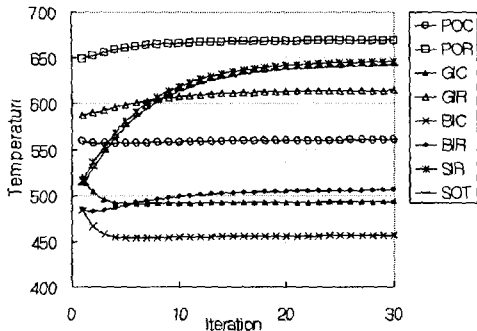


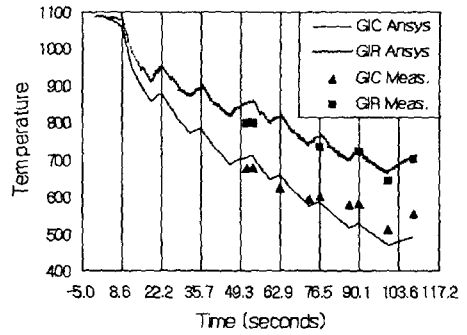
Fig. 5 Temperature history with respect to iteration

는 각종 경계조건은 주로 수냉, 공냉에 의한 냉각 조건으로서 이의 정확한 정의는 사실상 불가능하다. 본 연구에서는 이들도 모두 상수 열전달 계수로 표현되는 대류경계조건으로 처리하되, 형상이나 공정 특성에 의거하여 경계 면을 수개의 영역으로 구분하고, 영역별로 계수를 정의하였다. 이들은 다음과 같이 표현된다.

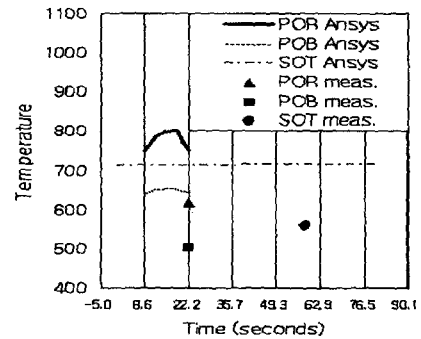
$$q = h(T - T_{\infty}) \quad (3)$$

여기서 T_{∞} 는 주변 온도를 나타낸다. 해석의 수행은 상용 소프트웨어 ANSYS를 이용하였으며, 장변축(major axis) 단면을 대상으로 축대칭 2차원으로 단순화하여 고려하였다. 이때 금형과 유리의 각종 경계조건에 부여되는 열전달계수의 총 개수는 51개이다. 본 연구에서는 이들에 대해 일반 열전달 문헌, 실험논문이나 경험으로부터 최대한 열전달 계수를 추정하고 그렇지 못한 부분은 임의 상수로 가정하여 해석을 수행하였다. 생성된 전체 유한요소 모델은 4절점 PLANE55 요소를 활용하여 요소 수 1000개, 절점 수 800개가 생성되었다.

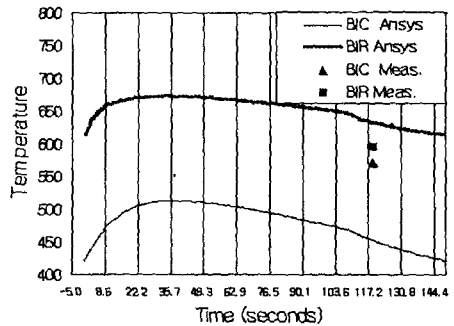
해석은 초기 조건에서 출발하여 주기적 상태에 이를 때까지 반복되어야 하는데, 3차원 문제에 대해 30회를 반복 계산한 결과, 매 사이클마다 특정 시점에서 주요 위치의 온도 이력을 Fig. 5에 보였다. 여기서 G, P, B, S는 각각 유리, 플런저, 몰드 및 셸을, O, I는 외면과 내면을 의미하며, C, R, B, T는 Fig. 2에 나타나 있는 위치다. Fig. 5를 보면 다른 것은 10회 근방에서 일정 온도로 수렴하고 있지만 셸은 30회 근방에서 수렴하고 있다. 따라서 주기적 상태의 온도를 구하려면 적어도 30회 반복해석이 필요하다. 계산에 이용된 컴퓨터는 CPU Athlon 1.4G, 메모리는 512M이며, 축대칭 문제의 경우 한 사이클 해석에 30초, 30사이클에 15분이 소요되었다.



(a) Temperature history of glass at last cycle



(b) Temperature history of plunger and shell at last cycle



(c) Temperature history of mould at last cycle

Fig. 6 Temperature history at last cycle at initial assumed heat transfer

3. 온도 측정 및 해석결과와의 비교

추정된 열전달계수를 이용하여 해석한 결과의 신뢰도를 검증하기 위해 실제 생산되고 있는 공정에 대해 온도측정을 수행하였다. 온도 측정을 위하여 적외선 방식의 비접촉 센서를 활용하였으며, 금형과 유리 각각의 특성을 감안하여 파장대를

1.1 - 2.0 μm , 4.8 - 5.2 μm 로 하였다. 또한 플런저의 냉각수 유입, 유출온도와 유량도 측정하여 이로부터 한 사이클 동안 플런저 수냉에 소요된 에너지도 계산하였다. 한 위치에 대한 온도 측정은 약 3~4 회 실시하고 이들을 평균하였다. 공정의 제약으로 인해 측정점을 충분히 확보 못했는데, 플런저의 경우 압입 후 대기상태에서, 코너 R 과 측면 B 지점 만이 측정 가능하였다. 우리는 공냉시작 시점과 종료 시점에서의 온도값을 기록하였다. 측정점은 내면 중심 C 와 코너 R 이다. 그러나 이 경우에도 온도 측정의 오류 등 문제점으로 인해 일부 위치에서는 온도가 기록되지 못하였고, 그 결과 측정점이 총 18 개로 나왔다. 열전달 해석결과로부터 금형과 유리 주요 지점의 온도이력을 측정치와 함께 Fig. 6 에 보였다. 여기서 범례의 Ansys 와 Meas. 는 각각 Ansys 해석결과와 측정결과를 의미하며, 영문 기호 GIC 등은 앞서 언급한 바와 같이 특정 점을 상징한다. 그림에서 수평축의 한 칸은 원반테이블의 한 위치를 나타내며 유리의 경우 Fig. 6(a)에서 보듯이 해당 위치에서 냉각이 이뤄진 후 다음 위치로 이동하는 동안 재 가열이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 일부 측정점이 빠져 있음을 확인할 수 있다. 유리, 플런저, 몰드 및 셀에 대해 해석결과와 측정결과와의 최대편차는 각각 64, 142, 119, 155 도로서 매우 크게 나타났다. 탈열량의 경우 해석결과는 1400 KJ 인 반면 측정 결과는 380 KJ 로 나타났다. 따라서 해석결과가 측정치와 온도 및 탈열량 모든 면에서 매우 큰 오차가 있음을 알 수 있다.

4. 최적화기법에 의한 열전달 계수 결정

앞 절에서 보는 바와 같이 열전달 계수의 단순 추정 만 가지고는 실측 공정과 유사한 해석결과를 내는 것이 불가능하다. 열전달 계수를 보다 정확하게 부여하기 위해 복잡한 실험이나 해석을 실시한다 해도 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 해석 온도와 실측 온도와 의 차이를 최소화 하기 위한 최적화 문제를 구성 하였다. 목적함수는 다음과 같이 측정점에서 실측치 Y_i 와 해석결과 T_i 와의 오차 자승합으로 정의 하였다.

$$\text{Min}_{\mathbf{h}} f = \sum_{i=1}^n (T_i(\mathbf{h}) - Y_i)^2 \quad (4)$$

여기서 \mathbf{h} 는 설계변수, 즉 열전달계수이며 n 은 측정점의 개수이다. 제한조건은 하나이며 금형 수

내부의 탈열에너지 J 가 실제 측정값 \bar{J} 와 같아야 한다고 정의하였다. 따라서

$$g = J(\mathbf{h}) - \bar{J} = 0 \quad (5)$$

한편 열전달 계수를 모두 고려하는 경우 설계 변수 개수가 51 개로서 지나치게 많아 해를 구할 수 없거나 무의미한 작업이 되므로 이를 합리적으로 줄이기 위해 다음의 세 가지를 고려하였다. 첫째, 고려사항은 공정의 특성을 감안하는 것이다. 예를 들어 유리 내면에 영역별로 약 6 개의 열전달계수를 부여하는 강제 공냉의 경우, 측정이 내면 중심점과 코너에 집중됨에 따라 해당 부위를 제외한 나머지 부위 열전달 계수는 선형 보간되는 것으로 가정하였다. 또한 일부 공냉 위치에서 동일 유량을 사용하는 점을 감안, 이들에 대해서는 동일 열전달 계수를 부여하였다. 이렇게 하여 개수는 28 개로 감소하였다. 둘째, 고려사항은 설계 변수의 개수를 측정점보다 적도록 제한하는 것인데 설계변수가 측정점의 수 보다 많아지면 변수과다로 인해 유일해를 얻지 못할 가능성이 크기 때문이다. 이를 위해 28 개의 열전달 계수를 대상으로 목적함수에 관한 민감도를 계산하여 크기가 가장 큰 것, 즉 가장 민감하게 영향을 주는 것부터 18 개를 선정하였다. 민감도를 계산한 결과가 Fig. 7 에 있으며, 이 중에서 가장 영향이 큰 것은 $h_{pf}(1,4)$ 로서 Fig. 1 에서 #4 위치의 유리 내면 중심부를 냉각시키는 계수이다. 마지막 고려사항은 n 개의 측정점 온도를 대상으로 각각의 열전달계수에 관한 민감도 벡터를 계산하여 이들 벡터 간의 상관관계를 조사하고 상관도가 높으면 그 중 하나는 제거하는 것이다. 예를 들어 열전달계수 h_a 과 h_b 의 경우, 이들에 대한 측정점 온도 민감도는 각각 $\partial T_i / \partial h_a$ 와 $\partial T_i / \partial h_b$ 인데 상관도 계

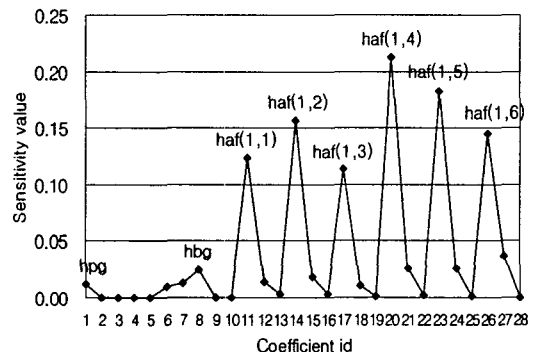


Fig. 7 Sensitivity of objective function with respect to each heat transfer coefficient

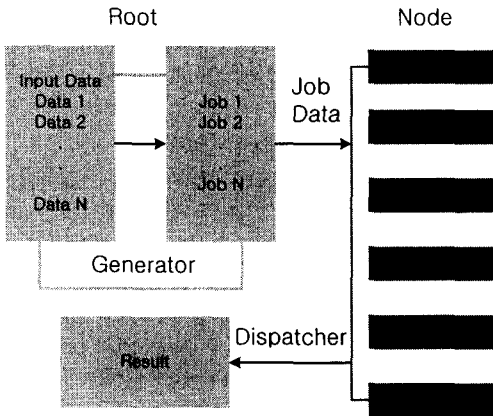
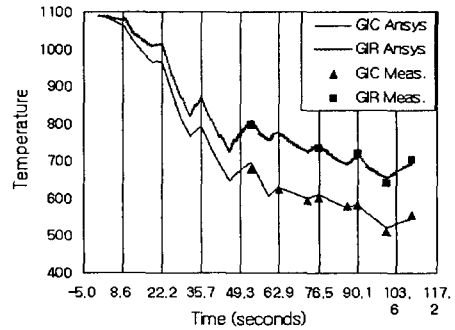


Fig. 8 Overview of enFuzion

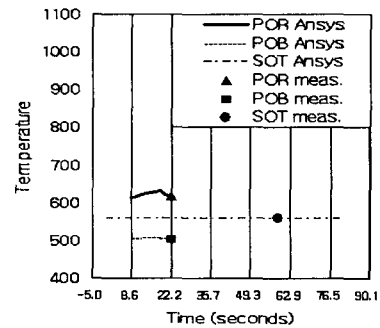
산을 위해 이들의 단위 벡터를 구한 후 내적을 계산하였고, 그 값이 0.95 이상이면 상관도가 높은 것으로 하였다. 상관도 분석결과 3쌍의 계수가 높은 상관도를 보였다. 그 중 가장 큰 상관도는 플런저 상부 h_{ph} 와 내측벽 단열부 h_{pas} 로써 그 값이 0.99 로 나타났고 따라서 이들을 단일 값으로 묶었다. 이렇게 하여 최종 선정된 설계변수는 모두 15 개이다.

5. 분산 컴퓨팅에 의한 최적화

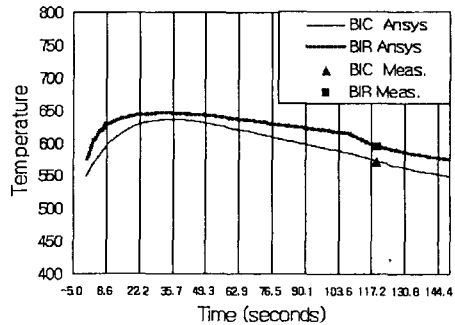
상기와 같이 정의된 최적화 문제의 해를 구하기 위해 상용 소프트웨어 Visual DOC 를 사용하였으며 순차적 선형계획법 알고리즘을 이용하였다. 이 알고리즘은 민감도 정보를 이용하여 해를 찾는 구배 최적화 방법의 하나이다. 본 해석 문제에 대해 민감도를 해석적으로 계산하는 것은 매우 어려우므로 유한차분법을 활용하였다. 그러나 한번의 열전달 해석을 위해 주기적 상태에 도달할 때까지 사이클을 수십 회 반복해야 하므로 계산시간이 적지 않게 소요되는 문제가 있다. 게다가 유한 차분에 의해 민감도를 계산할 경우 이는 매우 심각한 문제가 된다. 1 회의 최적화 스텝에 15 번 해석을 실시하므로 15x15 분 = 약 4 시간이 소요된다. 본 경우는 축 대칭 2 차원 문제이지만 3 차원의 경우 이것은 더욱 심각한 문제가 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 여러 대의 컴퓨터를 클러스터로 묶어 연산을 수행하는 분산컴퓨팅을 시도하였고, 이를 효율적으로 처리하는 상용 소프트웨어 EnFuzion 을 활용하였다. 이 시스템은 Fig. 8 에서 보는 바와 같이 운영체제에 관계없이 노드 클러스터를 구성할 수 있고, 근거리 네트워크(LAN)뿐 아니라 인터넷 상에서 노드를 구성하여 분산처리가



(a) Temperature history of glass at last cycle



(b) Temperature history of plunger and shell at last cycle



(c) Temperature history of mould at last cycle

Fig. 9 Temperature history at last cycle at optimized heat transfer coefficients

가능하다. 또한 각 노드 간 컴퓨터 성능 차이가 있어도 쉬운 노드를 자동으로 찾아 수행하는 장점이 있다. Visual DOC 에서 민감도계산을 분산처리하기 위해 별도의 사용자 제공 프로그램을 만들어 연결하고, 여기에 enFuzion 에 의한 분산처리 프로그램을 수행하도록 하였다. 한편 Visual DOC 는 목적함수 계산이 끝난 후 민감도 계산이 이뤄지기 때문에 목적함수 계산을 분산처리에 포함하여 처리할 수 없으며, 이로 인해 분산처리 효율을 감소

Table 1 Heat transfer coefficient values at initial and optimum solution for two difference cases

case 1		case 2	
initial design	optimum design	initial design	optimum design
2.400	0.338	0.240	0.327
0.270	0.256	2.700	0.228
4.000	0.520	0.400	0.524
0.100	0.141	1.000	0.155
1.000	0.376	0.100	0.434
0.500	0.589	1.000	0.745
0.500	0.050	1.000	0.048
0.300	0.497	0.100	0.455
0.300	0.608	0.100	0.502
0.300	0.497	0.100	0.429
0.300	0.302	0.100	0.458
0.300	0.184	0.100	0.181
0.300	0.285	0.100	0.257
0.300	0.280	0.100	0.265
0.300	0.302	0.100	0.277

시키는 단점이 있다. 또한 반응표면법은 분산처리에 매우 적합한 알고리즘임에도 불구하고, Visual DOC에서 실험계획 데이터를 외부 프로그램으로 내보내는 기능이 없기 때문에 현재로서는 분산처리가 불가능한 문제점이 있다. 본 연구에서는 해석 소프트웨어와 컴퓨터의 한계로 인해 5대의 컴퓨터만을 사용하여 수행하였다. 그 결과 최적해에 23 iteration 만에 수렴하였고, 해석과 민감도 계산이 각각 43회, 23회 발생하였으며 총 시간은 28시간이 소요되었다. 이것을 분산컴퓨팅 없이 단일 컴퓨터에서 시행했다면 약 97시간이 소요되었을 것으로 추정된다. 또한 보다 충분한 수의 컴퓨터를 확보하여 1회 해석시간 만에 민감도 계산이 이뤄진다면 총 소요시간은 17시간으로 감소된다.

수렴된 조건에서의 해석결과와 측정결과를 비교한 것을 Fig. 9에 수록하였다. 최적화 결과 유리, 플런저, 몰드, 셀에서의 최대편차가 각각 19, 3, 2, 3도로 나타나 측정치에 매우 근접했으며, 탈열량은 1400에서 380KJ로 감소하여 탈열량 제한조건을 만족하였다. 다른 초기 조건에서 출발해도 동일한 해를 얻는지 조사하기 위해 초기 설계치를 다르게 하여 최적해를 구한 결과 거의 유사한 답을 얻었다. 두 경우에 대해 열전달계수의 초기치와 최적해를 Table. 1에 수록하였다.

6. 결론

본 논문에서는 재료의 성형공정에서 발생하는 열전달 해석문제에서 적정 열전달계수를 찾는 방법을 유리의 프레스 성형 냉각 공정을 대상으로 하여 연구하였다. 유리 성형냉각공정은 반복적으로 진행되므로 점차 시간이 지나면서 동일한 온도 이력이 반복되는 주기적 상태에 도달하며, 이러한

열전달 현상을 해석하기 위해 많은 iteration과 시간이 소요되었다. 해석결과와 신뢰도를 검증하기 위해 비접촉식 온도측정 센서를 활용하여 측정 가능한 부위에 대해 온도측정을 실시하였고, 또한 금형 냉각수의 탈열에너지도 측정하였다. 그 결과 초기 가정한 열전달계수를 이용하여 해석한 결과는 실측치와 매우 큰 오차가 있음이 발견되었고, 이를 해결하기 위해 역문제적 접근을 시도하였다. 즉, 목적함수를 측정온도와 해석결과와의 오차 자승합으로, 제한조건은 금형 수냉부의 탈열에너지가 측정값과 같아야 한다는 것으로 정의하는 최적화 문제를 고려하였다. 해를 구하기 위한 방법은 최적화 소프트웨어 Visual DOC를 사용하였으며 순차적 선형계획법 알고리즘을 이용하였다. 민감도의 계산을 위해 설계변수를 미소량 증가시켜 계산하는 유한차분법을 활용하였으며, 이때 발생하는 많은 반복계산을 효율적으로 수행하기 위해 분산처리용 소프트웨어 enFuzion을 이용하여 여러대의 컴퓨터에 분산처리 하였다. 열전달 해석을 위해서는 상용 해석 소프트웨어 ANSYS를 활용하였다. 완성된 최적화 프로그램을 이용하여 유리성형공정의 2차원 축 대칭 문제를 대상으로 최적 열전달계수를 구하였다. 그 결과 열전달 계수를 문헌이나 경험으로 추정하였던 초기 조건의 경우 측정치와의 온도편차가 최대 155도이었던, 최적화 결과 최대 19도로 감소하여 실제 공정의 열전달 현상을 매우 정확하게 표현하였다.

후 기

본 연구는 삼성코닝(주)의 지원하에 이루어 졌으며 이에 감사하는 바입니다.

참고문헌

- (1) Tanaka, M. and Bui., H.D., (Eds.) 1992, *Inverse Problems in Engineering Mechanics : IUTAM Symposium*, Tokyo, Springer-Verlag.
- (2) Bui., H.D., et., al., (Eds.) 1994, *Inverse problems in Engineering Mechanics Proceedings of the 2nd International Symposium on Inverse Problems*, Paris, A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield..
- (3) Tanaka, M. and Dulikravich, G.S., (Eds.) 1998, *Inverse problems in engineering mechanics*, Elsevier.
- (4) Beck, J.V., Blackwell, B., and St. Clair Jr., C.R., 1985, *Inverse Heat Conduction - Ill-posed Problems*, Wiley, New York,
- (5) Kim, H.K., 1996, *Evaluation of Heat Transfer Coefficient Distribution by Inverse Heat Transfer Method*, Master's Degree Thesis. Mechanical Design

Department. Seoul National University.

- (6) Igor Gresovnik, 2000, *A General Purpose Computational Shell for Solving Inverse and Optimization Problems - Applications to Metal Forming Processes*, Ph. D. Thesis, University of Wales Swansea, U.K.
- (7) Visual DOC Version 2.0 "How To" Manual, Vanderplaats Research & Development, Inc. 2001.
- (8) enFuzion 6.0 User Guide, TurboLinux Inc., 2000.
- (9) ANSYS Thermal Analysis Guide Release 5.6, SASI IP, Inc. 1999.
- (10) Fellows, C.J. and Shaw, F., 1978, "A Laboratory Investigation of Glass to Mould Heat Transfer During Pressing," *Glass Technology*, Vol. 19 No.1, pp. 4~9.