[논문] 한국소성가공학회지, 제 15 권 제 9 호, 2006
Transactions of Materials Processing, Vol.15, No.9, 2006

최적화 기법을 활용한 열전달계수의 측정

김정태[#]· 임채호[1]· 최정길[1]

A study on the Evaluation of Heat Transfer Coefficient by Optimization Algorithm

J. T. Kim, C. H. Lim, J. K. Choi

(Received November 16, 2006)

Abstract

New method for evaluation of heat transfer coefficient is proposed. In general, many researchers have been studied about inverse problem in order to calculate the heat transfer coefficient on three-dimensional heat conduction problem. But they can get the time-dependent heat transfer coefficient only through inverse problem. In order to acquire temperature-dependent heat transfer coefficient, it requires much time for numerous repetitive calculation and inconvenient manual modification. In order to solve these problems, we are using the SQP(Sequential Quadratic Programming) as an optimization algorithm. When the temperature history is given by experiment, the optimization algorithm can evaluate the temperature-dependent heat transfer coefficient with automatic repetitive calculation until difference between calculated temperature history and experimental ones is minimized. Finally, temperature-dependent heat transfer coefficient evaluated by developed program can used on various heat transfer problem.

Key Words : Heat Transfer Coefficient, Heat Conduction, Optimization

1. 서 론

금속가공법(특히 주조, 열처리)에 대한 수치해석을 위해서는 해석 대상의 경계에서의 열전달 조건에 대한 정확한 이해가 필요하게 된다. 이러한 조건들에 대해 직접적으로 측정하는 방법에 대해서는 알려져 있지 않으며 많은 선행연구자들이 여러 가지 방법으로 시도를 하여왔다. 그 중 가장 많이 사용되는 방법이 역문제 해법(Inverse method)이다. 고체 표면에서의 열유속(heat flux) 또는 온도이력이 알려져 있지 않다면 대상물 내부에서 측정된 온도로부터 역열전도 문제해법(inverse heat conduction problem:IHCP)에 의하여 추정하여야 한다. IHCP에 대한 연구의 시작은 Stolz[1]에 의하여 단순형상의 담금질(quenching) 시에 열전달율을 계산하는 논문이 발표된 것으로 이후에 Beck[2,3]은 이 개념을 발전시켜 Stolz의 방법에 비하여 매우 작은 시간간격(time step)에서도 안정적으로 역문제(inverse problem)를 풀도록 하였다. 이후 주조와 열처리 분야에서 역문제로 고체 경계에서의 계면열전달계수를 구하는 연구가 계속 진행되어 왔다.

그러나 이전까지의 연구에서 역해법에 의하여 구해진 계면열전달계수(HTC)는 시간의존 함수의 형태였고 일반적인 열전달 문제를 풀기 위해서는 온도의존함수로의 열전달계수가 필수적이다. 온도의존함수 형태의 열전달계수를 구하기 위한 방법과 장치들이 지난 20여 년간 개발되어 왔고 대표적인 것은 SYSWELD와 같은 용접/열처리 해석 패키지에서 제공하는 형태의 수작업에 의한 단순 반복계산에 의한 방법이나 Segerberg[4], Felde[5]등

1. 한국생산기술연구원
교신저자: 한국생산기술연구원, naljeby@kitech.re.kr

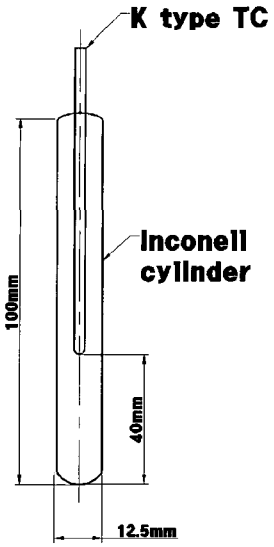


Fig. 1 IVF test probe

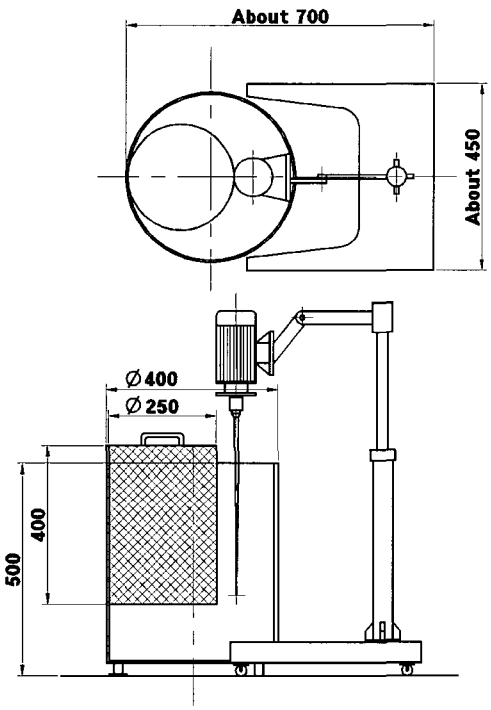


Fig. 2 Schematic diagram of cooling system

에 의해 제안된 열유속에 의한 방법들이 있다.

본 연구의 목적은 실험에 의해 온도이력만 주어지면 온도의존함수 형태의 열전달계수를 자동 반복계산에 의하여 결정할 수 있는 프로그램을 개

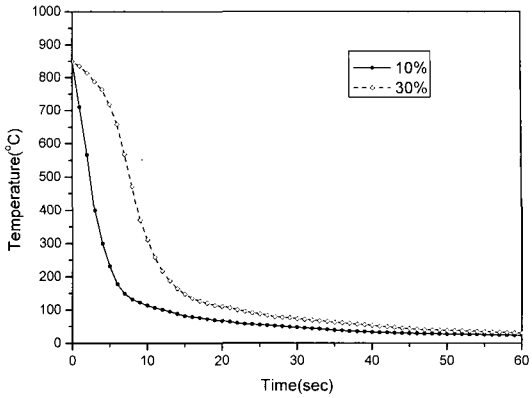


Fig. 3 (a) Experimental result-Measured temperature vs time

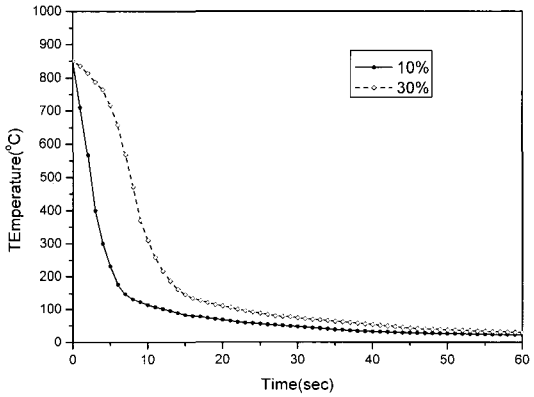


Fig. 3 (b) Experimental results-Cooling rate vs temperature

발하는 것이고 개발된 프로그램은 SQP(Sequential Quadratic Programming)이라는 최적화 알고리즘을 사용하여 반복계산 횟수를 최소로 줄이도록 구성되었다[6].

2. 실험방법

금속의 냉각 시 담금질 특성은 냉매의 냉각능을 결정하는 실험으로부터 얻어낼 수 있다. 이러한 실험을 하기 위한 여러 상용 열전대 들이 개발/사용되어 왔다. 이러한 열전대를 가열 후 냉매 속에 침적시켜 냉매 조건에 따른 시간/온도 데이터를 얻고 이로부터 냉각곡선 데이터를 얻게 되는데 IVF 열전대, Drayton 열전대와 Liscic-NANMAC 열전대 들이 대표적인 형태의 열전대이다.

본 연구에서는 온도이력을 얻기 위한 장치로 IVF 열전대를 사용하였다. 이 IVF 열전대는 ISO9950 표준에 따라 스웨덴의 IPER(Institute of Production Engineering Research)에서 만들어졌고 실험에 사용된 것은 12.5mm의 직경, 100mm의 Inconell 600 재질의 실린더에 Ktype 열전대가 삽입된 형태로 Fig. 1에 개략도를 나타내었다.

Inconell 재질의 열전대는 냉각 중에 상변태가 일어나지 않고 표면 산화가 거의 없어 정확한 온도측정이 가능하며 반복된 실험에 사용하기 유리한 조건을 제공해준다. 열전대는 전기로에서 850 °C로 가열된 후 냉매에 침적되는데 본 실험에서는 2가지 종류의 냉매(수용성 냉매인 Polyalkylene glycol 10%, 30%)에 대한 실험으로 냉각곡선을 구하였고 이 데이터를 최적화 프로그램을 개발하기 위한 온도이력 데이터로 사용하였다.

Fig. 2에는 교반기를 갖춘 냉각 장치에 대한 구조도를 나타내었으며 Fig. 3에는 상기의 설명과 같은 장치에서 측정된 온도이력과 냉각속도 곡선을 나타내었으며 수용성냉매의 농도가 증가할수록 냉각속도가 감소함을 확인하였다.

3. 최적화 수행절차

3차원 열전도문제를 푸는 방법으로는 전형적인 FDM 방법이 사용되었다. 이 열전도문제에 사용된 FDM 해법은 일찍이 본 연구그룹에 의해서 개발되어져 있던 것으로 FDM에 의한 3차원 열전도 문제는 많이 알려져 있으므로 본 논문에서는 이에 대한 자세한 설명은 생략하기로 한다. 이미 개발되어 있는 열전도 해석 프로그램을 최적화 알고리즘(Visual DOT-SQP)과 연결하여 실험결과와 해석결과의 오차가 특정한계 이하가 될 때까지 자동 반복계산을 할 수 있도록 프로그램을 구성하였다(Fig. 4). 실험결과는 1초 간격으로 저장된 데이터를 해석 프로그램에서 역시 1초 간격으로 저장된 해석 결과와 비교하였다. 두 결과 사이의 오차한계는 5°C 이하로 정의하였고 바꾸어 말하면 전체 냉각 단계에서 두 값의 차이가 5°C 이하일 경우 최적화의 반복계산은 종료된다. 특정한 냉각단계의 시간 영역에서 두 값의 차이가 5°C를 넘게 되면 HTC 데이터는 최적화 알고리즘에 의해 자동적으로 수정되고 다음

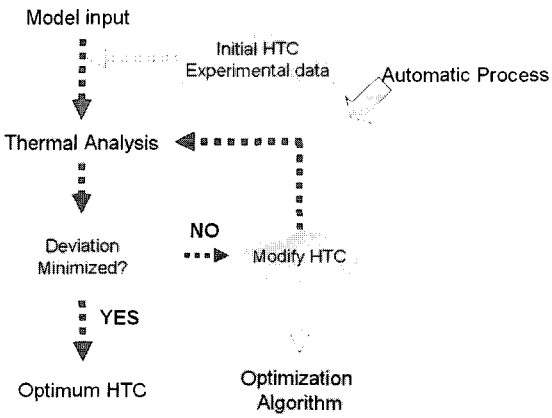


Fig. 4 Flowchart of HTC evaluation procedure

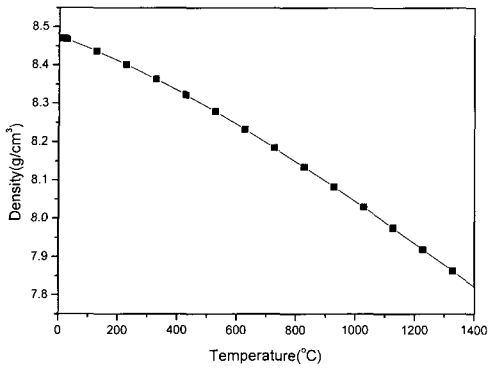
Table 1 Conditions for HTC evaluation

Condition	PAG conc.	Constraint*	Temperature step for HTC **
#1	10%	No	0~1100, interval 100°C(12 step)
#2	10%	No	0~300, interval 100°C, 350~900, interval 50°C(16 step)
#3	10%	Yes	0~900, interval 100°C (10 step)
#4	10%	Yes	0~300, interval 100°C, 350~900, interval 50°C(16 step)
#5	10%	Yes	0~900, interval 25°C(37 step)
#6	30%	No	0~1100, interval 100°C(12 step)
#7	30%	No	0~300, interval 100°C, 350~900, interval 50°C(16 step)
#8	30%	Yes	0~900, interval 100°C (10 step)
#9	30%	Yes	0~300, interval 100°C, 350~900, interval 50°C(16 step)
#10	30%	Yes	0~900, interval 25°C(37 step)

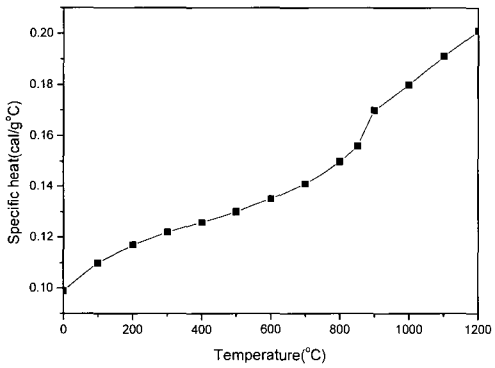
* discrepancy value between each temperature step and adjacent node is confined as 0.02
** initial values are set to 0.01 for each condition and each level

Table 2 Iteration No. of HTC evaluation for each condition

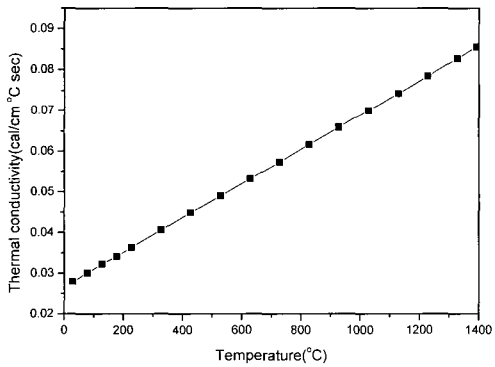
Condition	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
Iteration	417	428	600	949	2001	751	516	949	948	1595



(a) density



(b) specific heat



(c) thermal conductivity

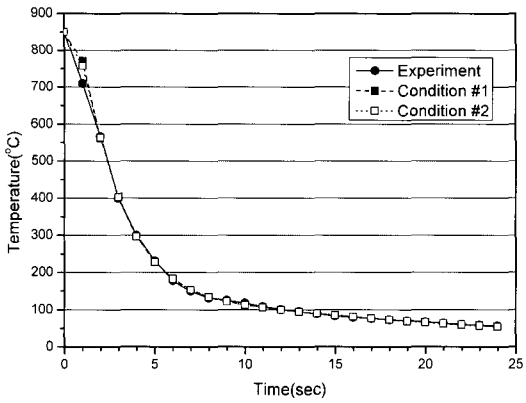
Fig. 5 Thermal properties of inconell 600

단계의 해석이 수행되게 된다. 해석이 수행되는 대상물은 이전 2장에 설명된 IVF 열전대이며 이를 직교좌표계의 요소망으로 요소분할하여 26×26×30의 전체 요소에 대한 해석을 수행하였고 열전대 외부의 조건은 최적화 반복계산에 의해 자동 변경되는 열전달 계수 데이터에 따른 대류 경계조건이 된다.

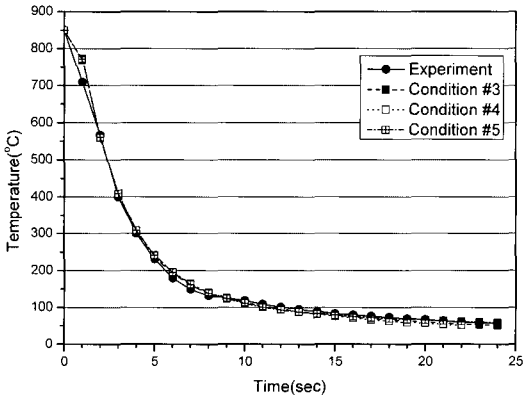
완성된 최적화 프로그램을 활용한 열전달계수의 결정을 위해서 10가지의 경우에 대한 조건을 설정하여 그에 대한 반복연산을 수행하였고 각각의 조건을 Table 1에 나타내었다. 실험으로부터 냉매의 농도는 2가지(10%, 30%), 열전달계수의 온도간격은 4종류, 제약조건을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우로 나누어 10가지의 경우를 설정하였고 이러한 조건의 설정은 각 조건에 따른 최적화 반복계산을 수행하면서 필요한 제약조건이 발생함에 따른 것으로 자세한 설명은 다음 4장에 나타내기로 한다. 열전달계수의 초기조건은 각 온도구간에 대하여 0.01의 상수로 입력을 하였으나 특정한 함수의 형태로써의 초기조건도 입력은 가능하다. 4종류의 온도간격은 10단계에서 37단계까지 변화를 시켜 최대 100°C 간격에서 최소 25°C 간격까지 편차를 주었다. 제약조건의 사용시에는 인접한 온도구간에서의 열전달계수의 오차범위를 0.02이하로 한정하여 최적화 반복 연산을 수행하였다. Fig. 5에는 참고문헌으로부터 얻어낸 열전달 해석에 사용된 Inconell 600의 열적 물성치를 나타내었다[7].

4. 결과 및 고찰

Table 2에 10가지 경우의 주어진 조건에 따라 최적화를 수행한 반복횟수를 나타내었다. 열전달계수의 온도간격의 수가 증가하고 제약조건이 사용되면 최적화 결과를 구하기 위한 반복횟수는 증가한다. 각각의 열전달해석에 소요되는 시간이 아주 짧은 것은 아니므로 적절한 온도간격을 사용하여 최적화에 소요되는 계산시간을 줄이는 것이 필요하며 온도구간의 증가만이 보다 나은 결과를 얻기 위한 최적의 조건이 아니라는 사실도 결과로부터 확인할 수 있었다. Fig. 6과 Fig. 7에는 실험

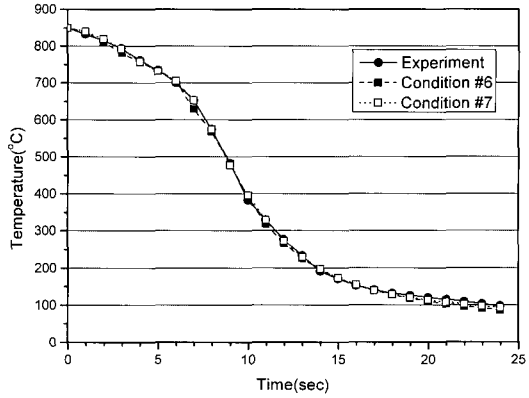


(a) No constraint condition

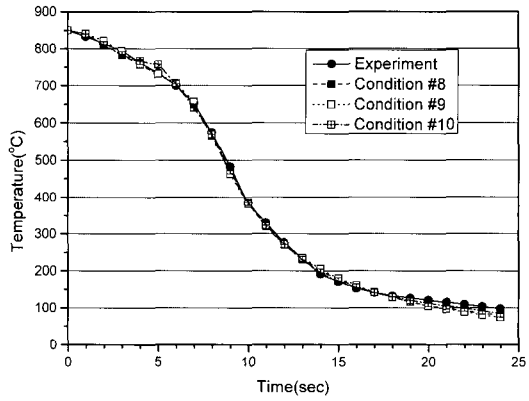


(b) constraint condition

Fig. 6 Comparison results of thermal histories for 10% solution



(a) No constraint condition



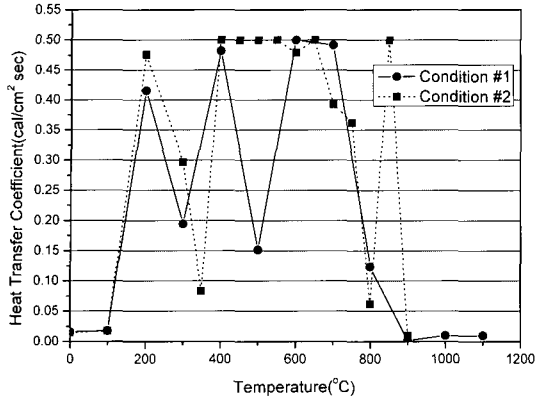
(b) constraint condition

Fig. 7 Comparison results of thermal histories for 30% solution

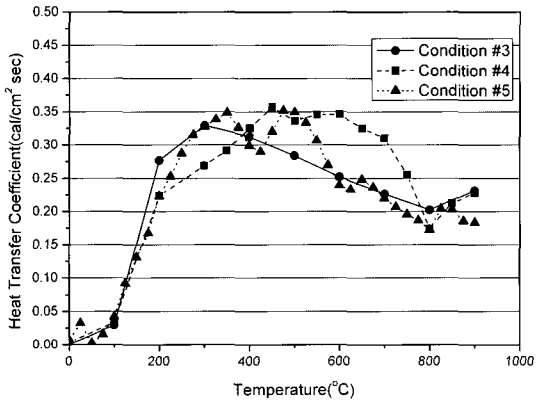
결과와 각 최적화 조건에 따른 온도이력을 비교하였다. 모든 조건에 대해서 온도이력은 실험결과와 잘 일치하는 값을 나타내었고 모든 조건에서 얻어진 열전달계수들은 유용한 것으로 판단할 수도 있다.

하지만 이 값들을 실제 해석에서 사용하기 이전에 좀더 면밀히 검토하여야 할 것이 있다. 실제 해석에 사용되고 있는 열전달 계수들의 전형적인 형태는 종모양의 형태(bell-type)를 취하고 있으며 열전도 문제의 특성상 불연속점이 존재하면 해석에 많은 오류를 나타내기 쉽다는 것이다.

Fig. 8 과 Fig. 9 에 각 조건에서 얻어진 열전달계수들을 그래프의 형태로 나타내었다. 최초의 조건(제약조건 없음; Fig. 8(a)와 Fig. 9(a))의 경우에는 매우 많은 불연속점이 나타나고 이 불연속 구간에서의 인접한 온도구간에서 열전달계수의 편차도 심하게 나타나고 있다(10% 용액의 경우 0.3, 30%용액의 경우 0.1). 또한 구해진 곡선의 형태도 전형적인 종모양의 형태에서 많이 벗어난 모습을 보여주고 있다. 최적화의 수행에 의해서 얻어진 결과는 유일해만이 존재하는 것이 아니므로 결과로 얻어진 해가 실제의 조건에 적합한지 아닌지에 대한 판단과 적합한 해를 찾기 위한 제약조건 등의 재검토는 최적화 수행 후에 다시 판단되어야 한다. 따라서 제약조건이 사용되지 않은 최초의 조건으로는 적절한 해를 얻기 어려울 것으로 판단되어 제약조건으로 2가지 조건을 검토하였다. 첫번째는 인접한 온도구간에서의 열전달계수의 차가 0.02를 넘지 못하도록 하는 것이고 두번째는 온도구간의 수를 증가시키는 것이다.

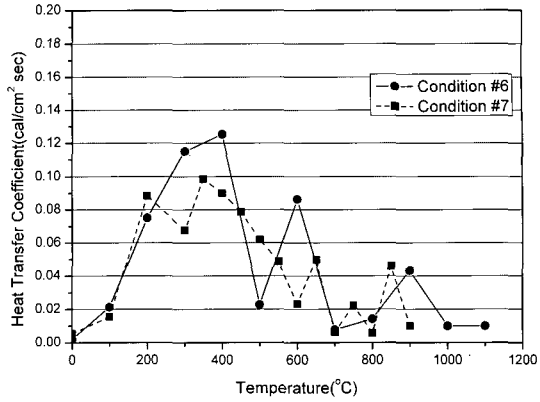


(a) No constraint condition

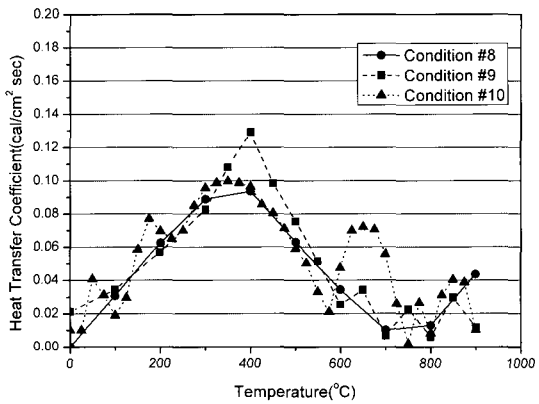


(b) constraint condition

Fig. 8 Obtained HTC results for 10% solution



(a) No constraint condition



(b) constraint condition

Fig. 9 Obtained HTC results for 30% solution

#2와 #7의 계산조건은 온도구간만을 늘린 경우이며 #3~#5와 #8~#10의 조건이 제약조건을 가한 경우로 제약조건을 가한 경우의 최적화 결과를 Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)에 나타내었다. Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)의 결과에서 볼 수 있듯이 제약조건을 사용하지 않고 온도구간만 늘린 경우에는 불연속점은 제거되지 않고 남아 있어 여전히 인접한 온도 구간 사이의 편차가 심하게 나타나고 있음을 확인할 수 있고 제약조건이 가해진 경우에는 온도구간의 수를 크게 늘리지 않더라도 불연속점이 거의 존재하지 않으며 곡선의 형태도 종모양의 형태에 근접해 가는 것을 확인할 수 있다.

제약조건을 가하며 온도구간을 늘린 경우에는 오히려 불연속점이 다시 나타나는 현상도 보이며 전체 반복횟수도 많이 증가하여 최적화에 유리한 조건이 아닌 것으로 판단된다. 이상과 같은 여러 조건의 결과로부터 최적화 반복계산을 위한 가장 이상적인 조건은 온도구간의 수를 16~20(50 °C 간격)으로 고정하고 제약조건을 사용하는 것이라는 결론을 내릴 수 있다.

5. 결 론

실험에 의하여 특정한 조건에 대한 온도이력 곡선만 주어지면 최적화 알고리즘을 사용하여 자동적인 반복계산에 의해 온도의존함수로의 열전달계수를 결정할 수 있는 프로그램을 완성하였다. 10%, 30%의 polyalkylene glycol 수용액에 IVF 열전대를 사용하여 실험을 수행하고 최적화 반복계산을 통하여 온도구간은 16~20(50°C 간격), 제약조건 사용이 필수적이라는 최적화에 필요한 조건을 확인하였다. 여러 종류의 냉매와 교반조건, 온도조건에 대한 실험을 수행한 후 본 연구에서 개발된 프로그램을 사용하면 실제 열처리

공정의 해석에 사용될 냉매의 특성을 잘 표현하는 열전달계수의 결정이 가능하며 이는 열처리 해석 또는 주조공정의 해석에 필요한 경계조건의 데이터 입력에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] G. Stolz, Jr., 1960, ASME Journal of Heat Transfer (1960), p. 20.

[2] J. V. Beck, 1970, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 13, p. 378.

[3] J. V. Beck, B. Blackwell, A. Haji-Sheikh, 1996, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 39, No. 17, p. 3649.

[4] S. Segerberg, J. Bodin, I. Felde, 2004, Heat treating Progress, Vol. 3, p. 28.

[5] I. Felde, T. Reti, S. Segerberg, J. Bodin, G. S. Sarmiento, G. E. Totten, J. Gu, 2004, 14th Congress of IFHTSE, Shanghai, China, p. 519.

[6] J. S. Arora, 2001, Introduction to optimum design (Korean Language Edition)(McGraw-Hill Korea Inc., Korea).

[7] Y. S. Touloukian, C. Y. Ho, 1977, Thermophysical properties of matter(IFI/Plenum Data Corporation, USA).