

고온제트에 의한 금형표면 가열기법에서의 유량, 온도, 가열시간의 결정

최성주^{†,1} · 유영은² · 김선경^{#,3}

¹ 서울산업대학교 나노 아이티 공학과

² 한국기계연구원

³ 서울산업대학교 금형설계학과

Determination of mass flow rate, jet temperature and heating time in mold surface heating technology using hot jet impingement

Sung-Ju Choi^{†,1} · Young-Eun Yoo² · Sun-Kyoung Kim^{#,3}

¹ Department of Nano-IT Engineering, Seoul National University of Technology

² Korea Institute of Machinery and Materials

³ Department of Die and Mold Design, Seoul National University of Technology

Abstract : Development of surface heating technology using hot jet impingement onto mold inner surface for improvement of pattern transcription. This study is focused on how to control the parameters related to hot jet impingement. The mass flow rate, the jet temperature and the duration of the impingement are major parameters. The nozzle design and other geometric configurations also affect the heat transfer to the surface. In terms of heat transfer analysis, the most important number is the heat transfer coefficient, which is influenced by the mass flow rate, nozzle design, distance between the nozzle tip and the surface. In summary, several parametric studies using the developed model are conducted to investigate the effects of mass flow rate, jet temperature and Heating Time in Surface heating technology using hot jet impingement onto mold.

Key Words : Injection Molding, hot jet impingement, Mass flow rate, Jet Temperature, Heating Time

1. 서 론

최근 정보화, 바이오산업의 발달과 더불어 제품의 정밀화와 소형화가 요구되어지고 있으며 이러한 제품의 생산을 위해 플라스틱 제품 성형공정의 필요성이 증가되고 있다. IT, BT, NT산업에서 전통적인 금속소재는 고분자 소재에 비해 상대적으로 광학 특성의 저하와 생산원가의 절감 등에 의해 성형공정의 산업 생산성 및 경제성에 많은 문제점을 가지고 있다. 반면 고분자 소재는 광학적 특성과 성형성이 용이할 뿐만 아니라 대량생산에 매우 적합

하고 경량화에 유리하며 이를 적용한 제품 및 공정의 연구가 요구되어 진다. 특히 플라스틱 제품 성형 공정 중 하나인 마이크로 사출성형 (Micro-injection molding)은 산업생산성 및 경제성에 큰 장점이 있는 성형 공정으로 마이크로 구조물의 생산에 각광 받고 있다. 이러한 미세 패턴 플라스틱 구조물의 사출 성형공정은 성형온도, 금형온도, 사출압력, 사출속도 등이 매우 중요한 영향을 미친다.

특히 금형온도의 제어 기술은 미세 패턴이 존재하는 마이크로 부품 사출 공정에서 중요한 공정 변수로 잘 알려져 있다.[1] 기존의 오일을 이용한 금

형온도의 제어는 고온의 금형을 유지하는데 있어 가열시간과 냉각시간을 제어하는데 한계가 있다. 이러한 이유로 최근 초고온의 금형을 위한 다양한 온도 제어시스템이 제안되었다. 특히 RHCM(Rapid heat cycle molding), MmSH, 적외선 가열법, 고주파 가열법 등이 널리 알려져 있다.[2] 금형을 초 고온으로 유지 할 수 있는 이러한 기술은 마이크로 사출성형뿐만 아니라 웰드 라인이나 광택등의 금형의 외관 품질개선에 있어서도 뛰어난 장점을 보인다.

본 연구에서는 앞서 제안된 고온의 충돌제트에 의한 금형온도 제어기술에서 공정 변수인 유량, 제트온도, 가열시간에 따른 금형에서의 온도 분포를 수학적 모델을 이용하여 예측 하였다. 각각의 요인에 따른 결과 값을 분석하고 최적의 온도 제어를 위한 공정 조건을 제안하고자 한다.

2. 이론 및 모델링

2.1. 고온 제트에 의한 금형표면 가열기법

기존에 제안된 고온 금형의 방식의 한계를 극복하기 위해 이미 가열 및 냉각 기법으로 검증되고 널리 상용화된 충돌제트를 이용하는 금형 가열기법이다. 충돌제트는 대류열전달계수를 향상시켜 금형의 표면온도만을 급속 가열 및 냉각을 가능하게 하며 특히 기존 금형의 구조 변경 없이 사용가능하고 유량, 제트온도, 노즐형상, 노즐위치를 유동성 있게 재현할 수 있다는 장점이 있다.[3]

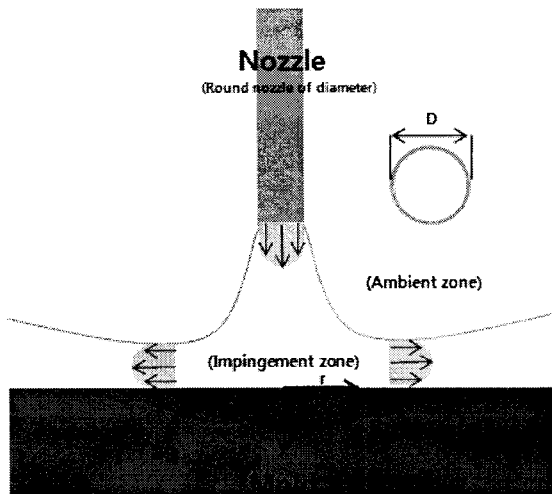


Fig. 1. Schematic representation of impinging jet

2.2. 열침투 깊이 예측 이론

본 연구에서는 제트분사에 의해 금형내부의 열침투 깊이(Thermal penetration depth)를 분석하기 위해 반무한 고체라 가정하여 아래와 같은 식을 사용하였다. 반무한고체(Semi-infinite solid)는 경계를 이루는 하나의 표면으로부터 내부로 향하는 방향을 제외하고는 무한히 뻗어 있는 경우를 말한다. 이러한 반무한 고체는 표면에 열적인 변화가 가해질 때 고체 내부에서 1차원 과도열전도를 가정한다. 특히 표면으로부터 충분히 멀리 떨어진 내부에서 표면의 열적 변화를 감지하지 못하는 초기상태에서는 유한의 매질이라도 반무한 매질로 취급하여 보다 간단하게 열적변화를 감지할 수 있다. [4]

$$\frac{T_{(x,t)} - T_i}{T_\infty - T_i} = \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \left[\exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2at}{k^2}\right) \right] \times \left[\text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{h\sqrt{at}}{k}\right) \right] \dots (1)$$

$$\bar{h} = \frac{Nuk}{D_h} \dots (2)$$

$$Re = \frac{V_e D_h}{\nu} \dots (4)$$

$$\frac{Nu}{Pr^{0.42}} = G\left(\frac{r}{D}, \frac{H}{D}\right) F_1(Re) \dots (3)$$

$$G = \frac{D}{r} \frac{1 - 1.1D/r}{1 + 0.1(H/D - 6)D/r} \dots (8)$$

$$Pr = 0.685$$

$$F_1 = 2Re^{1/2} (1 + 0.005Re^{0.55})^{1/2} \dots (7)$$

$$V_e = \frac{Q}{A} \dots (5)$$

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \dots (6)$$

$$D_h = D (\partial nozzle)$$

$$\nu = \text{Kinematic viscous}$$

Martin[5]이 제시한 충돌제트의 단일 원형노즐에 대한 관계식을 이용하여 대류열전달계수를 구하였다. 식(1)에 의하면 반무한 고체의 표면은 대류열전달에 의해 가열되는데 표면에서 대류열전달계수 h 와 주위온도 T 를 경계조건으로 적용하여야 한다. 식(2)을 이용하여 대류열전달계수 h 를 계산하기 위해서는 변수인 평균 Nusselt numbers를 식(3)을 이용하여 구할 수 있으며 Reynolds number를 포함한 필요한 변수는 식(4),(5),(6),(7),(8)를 이용하여 구한다. 식(1)에서의 우 변항을 A로 정리하여 식을 간단화하면 식(9),(10)으로 정의할 수 있다.

$$\frac{T_{(x,t)} - T_i}{T_\infty - T_i} = A \dots (9)$$

$$T_{(x,t)} = A(T_\infty - T_i) + T_i \dots (10)$$

$T_i = \text{mold Temperature}$

$$T_\infty = T_{aw} (11)$$

고온의 제트를 이용하여 저온의 표면을 가열하는 경우에는 주변의 찬 공기의 유입현상(entrainment) [6]이 발생하므로 이를 고려하기 위하여 식(11)과 같이 단열벽면온도(adiabatic wall temperature)를 계산하여 이를 주위온도 T 로 사용하였다.

$$T_{aw} = (T_{jet} - T_{amb})\eta + T_{amb} \dots (12)$$

$$\eta = 0.35 + 0.6e^{-0.01(Z/D-2)^{2.2} - 0.1(x/D)^{2.5}} \dots (13)$$

(when $0 \leq x/D \leq 3.5$)

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^r \eta(x) dx}{r} \dots (14)$$

단열벽면온도는 식(12)와 같이 계산 하였으며 유효성(Effectiveness) $\bar{\eta}$ 는 식(13),(14)로 표현 된다. 이때 제트와 주변의 찬 공기와의 온도차가 크고 공기의 정지 열에너지가 크므로 제트의 동온도(Dynamic temperature)에 의한 효과(Recovery effect)를 무시할 수 있다.[7]

최종적으로 $T_{(x,t)}$ 값을 이용하여 시간에 따른 금

Table 1. Parameters of Equations

air					
Properties of Gases for Free Jet					
T (K)	ρ (kg/m ³)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (w/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
700	0.4975	68.10	52.4	98	0.695
750	0.4643	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	121.9	66.7	168	0.726

Properties of Mold			
Material	ρ (kg/m ³)	k (w/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)
Iron Pure	7870	80.2	23.1

Nozzle Design			
Material	r (jet 반경) (m)	D (m)	A (m ²)
Titanium	0.01	0.004	23.1

형 각 위치에서의 온도를 계산 할 수 있으며 유량, 제트온도, 가열시간을 변수로 최적의 공정 조건을 계산하였다.

2.3. 실험 계획

2.3에서 언급한 계산식을 microsoft office excel을 이용하여 금형표면에서부터 깊이 방향으로의 각 위치에 따른 온도 분포를 계산 할 수 있도록 프로그래밍 하였다. 3가지 변수에 대한 최저값과 최고값을 정하고 Table.2와 같이 실험계획법을 수립하였다.

Table 2. Three factors and values for jet heating

Parameters	Level	Analysis	
		Factors IDs	Values
유량 (Mass flow rate) (Kg/sec)	1	A	0.005
	2		0.007
	3		0.009
	4		0.011
제트온도 (°C)	1	B	500
	2		600
	3		700
	4		800
가열시간 (sec)	1	C	20
	2		30
	3		40
	4		50

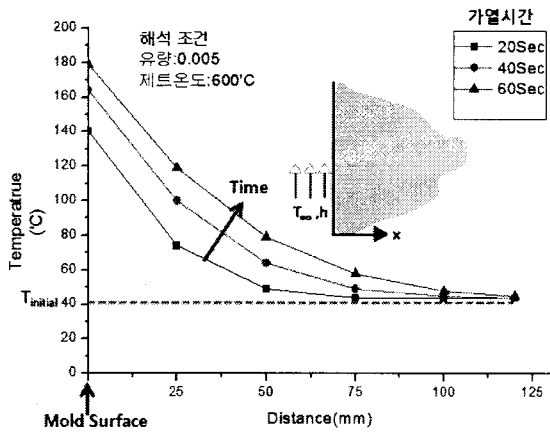


Fig. 2. Schematic representation of impinging jet

3. 결과 분석

금형과 30mm 떨어진 곳에서 고온의 제트 분사 시 금형 표면 ($x=0$) 위치에서의 온도를 계산 하였다. 첫 번째로 3가지의 변수 중에서 제트온도를 고정변수로 정하고 목표하는 금형표면의 온도가 200°C 일 때 유량과 가열시간의 관계를 Fig.3에 나타 내었다. 금형 표면에서 원하는 온도를 얻기 위해서 제트 온도가 500°C로 상대적으로 낮을 경우에는 가열시간에 따라 차이는 있지만 0.04kg/sec 이상의 높은 mass flow rate값을 요구하며 제트온도가 상대적으로 높은 800°C에서는 약 0.005kg/sec의 작은 유량을 필요로 하며 가열시간의 영향이 줄어들어 드는것을 관찰 할 수 있었다.

두 번째로 유량을 고정변수로 정하고 목표하는 금형 표면의 온도가 200°C로 첫 번째 계산과 동일하게 계산한 결과 Fig.4 와 같이 가열온도에 따른 가열시간 그래프를 얻었다. mass flow rate가 0.005 kg/sec로 낮은 경우 가열시간을 30 Sec 대로 낮추기 위해서는 800°C 이상의 고온의 제트온도를 필요로 함을 예측하였으며 mass flow rate가 낮아질수록 가열시간이 급속히 줄어들며 가열온도가 약 600°C 부터는 가열온도의 영향이 현저히 줄어들어 드는것이 예측 되었다. 이로 인하여 가열온도가 최대 약 30Sec 정도의 일정 시간이 필요함을 알 수 있었다.

세 번째로 가열시간을 고정변수로 정하고 가열 온도와 mass flow rate에 따른 그래프를 Fig.5 에 나타내었다. 역시 가열온도가 높을수록 약 0.01kg/sec

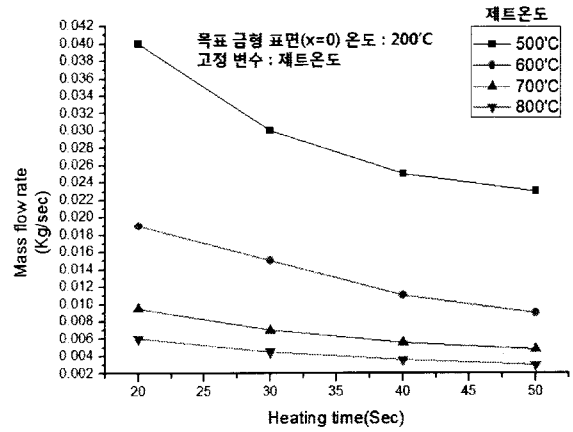


Fig. 3. Schematic representation of impinging jet

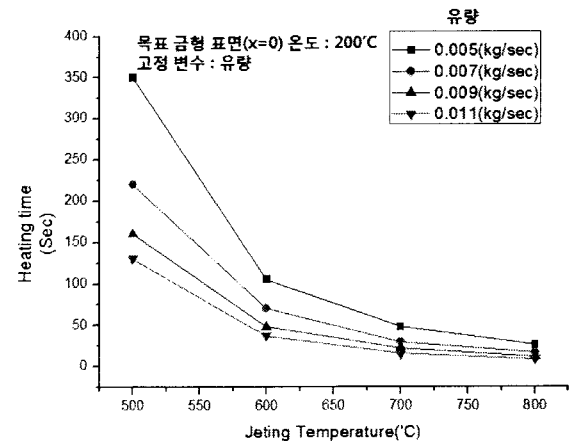


Fig. 4. Schematic representation of impinging jet

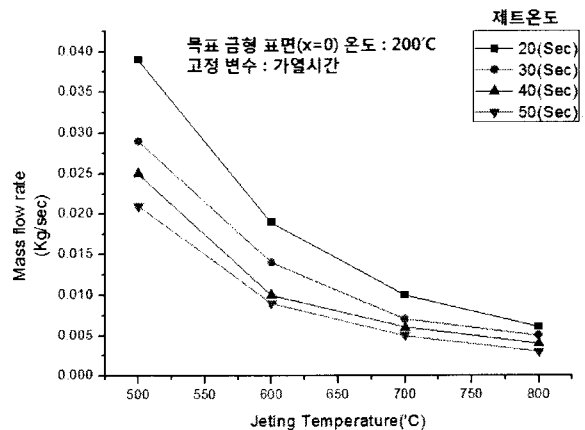


Fig. 5. Schematic representation of impinging jet

의 작은 mass flow rate가 필요하며 가열 온도가 높아 질수록 mass flow rate의 영향이 현저히 작아 지는 것을 알 수 있었다.

각 변수에 따른 결과 값을 종합해 보면 각각의 변수는 금형 표면의 온도 제어에 상호적인 관계를 가지고 있으며 목표로 한 200℃의 금형 표면의 온도를 얻기 위해서 가열온도가 700℃ 이상인 경우에는 나머지 변수들의 영향이 적으며 700℃ 이하인 경우 가열시간과 mass flow rate의 영향이 커져 이들 변수의 제어가 중요해짐을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존에 제안된 충돌 제트를 이용한 고온의 온도 제어 기술을 금형의 가열/냉각 공정에 적용하기 위하여 공정 변수인 유량, 제트온도, 가열시간에 따른 금형에서의 온도 분포를 수학적 모델을 이용하여 예측 하였다. 각각의 요인에 따른 결과 값을 분석한 결과 목표로 하는 금형 표면의 온도가 200℃ 일 경우 30mm위치에서 금형에 분사되는 제트온도가 약 700℃에서 나머지 변수들이 미치는 영향이 차이가 있음을 예측 할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 고온제트에 의한 금형 표면 가열 장치의 여러 가지 제약 사항과 실제 공정을 고려하여 0.007kg/sec의 유량, 약 700℃의 제트 온도, 30 Sec의 가열시간을 온도 제어 공정의 최적 조건으로 선정하였다.

향후 예측된 각 변수에 따른 온도결과 값 들을 통해 최적 조건으로 가열 장치를 제어 하고 본 논문에서 예측된 온도와 실제 실험 조건을 비교 하기 위해 온도 센서를 이용한 실험 금형을 제작 하여 데이터를 추가 보완할 예정이다. 또한 실제 마이크로 사출 공정에 적용하여 패턴의 전사성에 미치는 영향을 실험 할 예정이다.

6. 후기

본 논문은 서울테크노파크의 차세대 패키징 공정, 장비 실용화 사업의 일환으로 지식경제부 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1) 유영은, 서영호, 제태진, 최두선, 2005, 미세패턴

사출성형 기술, 한국정밀공학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 23~29.

2) 김경하, 김선경, 유영은, 제태진, 최두선, 2006, 웰드라인 제거를 위한 고온 기체 분사를 이용한 그 금형 표면의 가열기법, 한국 금형 공학회 논문집, pp. 214~219.

3) D-H. Kim, M-H Kang, Y-H Chun, 2001, Development of a new injection molding technology: Momentary Mold Surface Heating process, Journal of injection molding technology, vol. 5, No.4, pp.229~232

4) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, 1959, Conduction of heat in solids, Oxford: Clarendon Press, 2nd ed.

5) Martin, H., J. P. Hartnett and T. F. Irvine, Jr., Eds. 1977. Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surface, Advances in Heat Transfer, Vol. 13, Academic Press, New York,

6) Jambunathan, K., Lai, E. Moss, A. and Button, B. L., 1992, A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No. 2, pp. 106~115.

7) K. Jambunathan, E. Lai, M. A. Moss and B. L. Button, 1992, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No.2, June