[논문] 한국소성가공학회지, 제 16 권 제 1 호, 2007
Transactions of Materials Processing, Vol.16, No.1, 2007

나노 패턴의 전사성 향상을 위한 고온 기체 분사를 이용한 금형 표면의 가열 기법

김경하[1]· 김선경[#]· 유영은[2]· 제태진[2]· 최두선[2]

Surface Heating Method Using Hot Jet Impingement for Improving Transcription of Nano-Pattern

K. H. Kim, S. K. Kim, Y. E. Yoo, T. J. Je, D. S. Choi

(Received November 16, 2006)

Abstract

In this paper, a mold temperature control method for injection molding is proposed. The inner surface of mold is locally heated by jet impingement to improve pattern transcription. Heating by hot jet is completed while the mold is open. An experimental system that realizes the proposed idea has been built, which includes mold, nozzle assembly and heater. Actual injection molding process including the proposed heating procedure has been conducted to verify the validity of the method. The process has been done for several conditions with different jet temperatures and duration of heating. The results from different conditions are compared.

Keywords : Injection Molding, Stamper, Mold Surface Temperature, Jet Impingement

1. 서 론

최근 나노 기술은 가장 주목 받고 있는 분야이며 특히 나노 크기의 치수를 가지는 구조물의 제작에 큰 관심이 집중되고 있다. 이를 구현하기 위해 많은 성형방법 중 사출성형은 대량으로 신속, 정밀할 뿐만 아니라 우수한 반복 정밀도를 유지하면서 최소비용으로 생산할 수 있다는 능력을 갖고 있다. 따라서 플라스틱 수지를 이용한 미세패턴 성형의 제품들은 앞으로 꾸준히 그 적용범위가 넓어질 것으로 예상되며 고부가 가치를 창출 할 것으로 생각된다. 그러나 금형을 이용한 나노 구조물의 성형에서 금형의 온도가 낮으면 용융수지가 충진시 금형 온도로 인하여 급속하게 고화되어 미충진이 일어난다. 이를 해결하기 위해 금형 온도를 높게 올리기 위해 다각적인 측면에서 여러 기술들이 구현되고 있다.

고온금형은 현재 가장 두드러지게 발전하고 있는 성형기술로써 RHCM(Rapid Heat Cycle Molding)[1], MmSH[2~3], 적외선 가열법[4], 고주파가열법[5], 진열히터방법[6], 단열법 [7]등이 널리 알려져 있다. 고온금형은 금형표면온도를 빠르게 가열하고 냉각하는 성형방법으로써 내열변형성, 초고광택 및 무광택, 표면경도, 내약품성, 웰드라인의 제거, 나노패턴의 기능성, 사출성형품 제조, 초박막성형제품 제조, Solid Skin Structural Form 사출성형품 제조, 플라스틱도금제품의 성능향상과 불량감소, 성형 사이클 타임 단축 등 뛰어난 성능을 가지게 된다. 뿐만 아니라 마이크로 부품 사출에서의 유동 문제를 해결하는 데도 사용된다[8].

본 연구에서는, AAO(Anodic Aluminum Oxide) 나노 스템퍼를 금형에 인서트 시키고 대류열전달계

1. 서울산업대학교 대학원 정밀기계공학과
2. 한국기계연구원
교신저자: 서울산업대학교 금형설계학과, sunkkim@snut.ac.kr

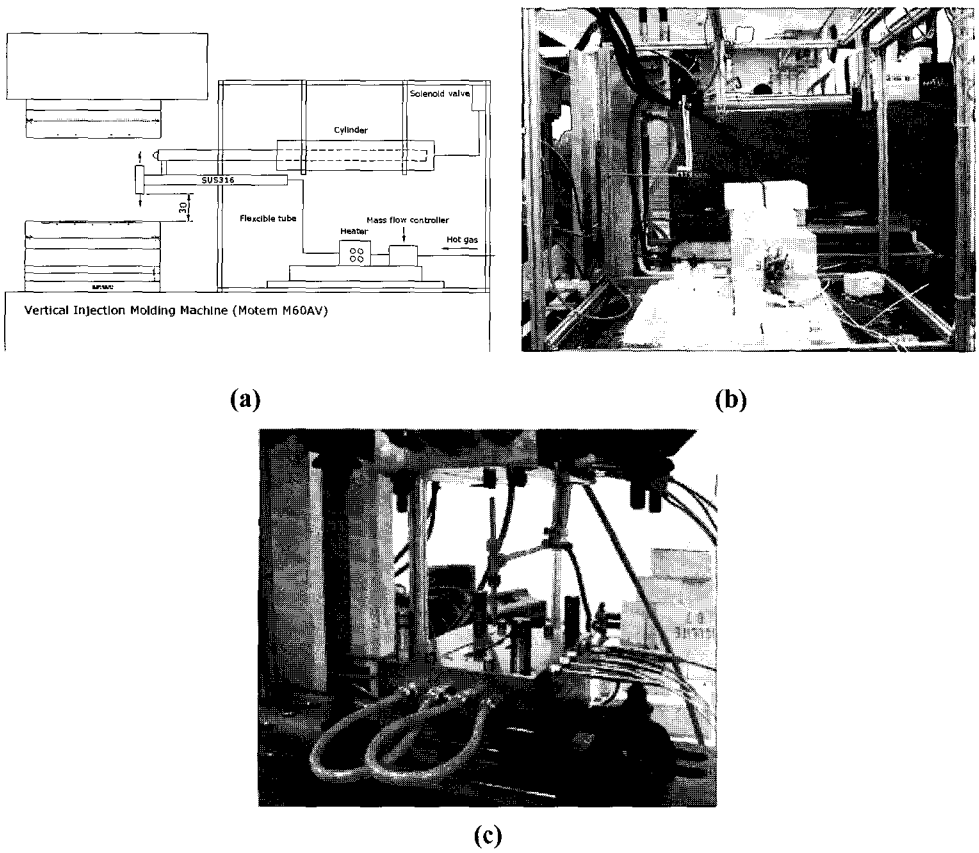


Fig. 1 (a) Schematic representations of heating system using hot-jet impingement, (b) Heater and nozzle assembly, (c) Heating the mold surfaces

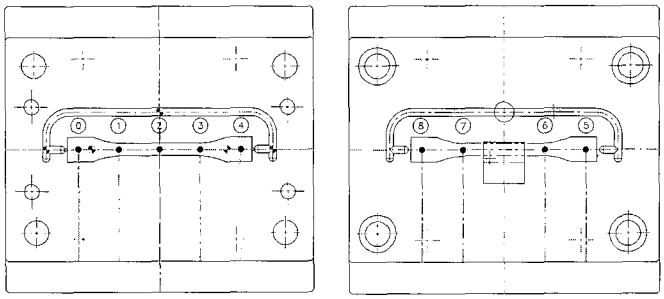
수를 향상시킬수 있는 방법 중 하나인 충돌제트를 이용하여 고온, 고압의 기체를 금형의 Cavity, Core 에 국부적으로 직접 분사하는 시스템을 구현하였다. 또한 SEM(Topcon SM-350)을 이용하여 전사성을 확인하였다.

2. 시스템 구현

본 연구에서는 고온, 고압의 기체를 생성시키기 위해 AISI316 튜브를 코일형식으로 감아 세라믹으로 구성된 벽돌에 삽입하고 탄소봉을 튜브 안쪽에 배치시킨다. 또한 탄소봉을 트랜스포머와 연결하여 고온기체를 생성시킬 수 있도록 하였다. 이때 각각의 탄소봉을 고르게 가열하기 위해 병렬연결을 하였다. 또한 고온기체를 금형에 직접 분사시키기 위한 노즐을 제작하였고 노즐을 이송하기 위해 공압실린더를 사용하였다. 이를 고정시키기 위해 알루미늄 프로파일을 이용하여 틀을 만들어 사출기에 고정시켰고 이를 Fig. 1에 도시하였다.

3. 스템퍼 제작

본 연구에서 사용하는 AAO 스템퍼는 여러 공정을 거치면서 제조된다. 알루미늄을 양극산화시키면 알루미나로 변하면서 구멍은 스트레스를 가장 덜 받을 수 있는 배열로 저절로 정렬(self-align)되지만 배열은 불규칙하다. 하지만 알루미늄과 알루미나의 경계면에서는 규칙적인 배열의 구멍을 가지게 된다. 규칙적인 배열을 가진 구멍을 가공하기 위해 알루미나를 부식시켜 층을 없애고 다시 산화시키면 보다 규칙적인 배열의 구멍을 가공할 수 있다. 여기에 식각을 하면 구멍의 내부가 고르게 가공되어 구멍의 깊이와 구멍간의 간격을 처



(a) **(b)**

Fig. 2 Mold design of (a)upper and (b)lower plate and locations of 9 thermocouples

음과 같이 유지하면서 구멍의 크기만 크게 만들 수 있으며 이러한 공정을 구멍 확장(pore widening)이라고 한다.

AAO 나노 템플레이트의 구멍 지름 및 구멍간의 간격은 수백 나노미터 범위이며 양극산화의 전압, 산용액의 종류, 농도, 온도등을 변화 시키면 재현성 있게 조절할 수 있다. 또한 구멍의 깊이는 양극산화의 시간에 비례하는데 수 백 마이크론의 깊이 구멍도 만들 수 있어서 길이/지름의 비가 큰 구멍도 쉽게 얻을 수 있다.

본 연구에서 사용한 스템퍼는 두께 2mm, Pore 직경 50nm, 높이 1.2~1.5μm 이며 Fig. 3(a)는 전자주사 현미경(SEM)으로 촬영한 이미지를 나열한 것이다.

4. 실험 조건 및 방법

4.1 실험 장비 및 조건

본 연구에서는 금형온도를 신뢰성 있게 측정하기 위해 이론적으로 표면온도를 추정하고, K-type 열전대 (SENSOR-TECH Type SS-2100)를 제품으로부터 6mm떨어진 곳에 실장하였다. 기체의 유량을 제어하기 위해 질량유량 컨트롤러인 FMA-2613A (Omega)를 사용하였다. 데이터 기록 시스템으로는 National Instruments사의 SCXI-1000을 사용하였다. 사출성형기는 모템의 M60AV(수직형)를 사용하였고 수지는 폴리프로필렌(SK B350F)를 사용하였다. 사출제품은 두께 2mm의 인장시편을 사용하였고 상형에 AAO 스템퍼를 지그를 이용해 시편에 패턴이 전사되도록 고정하였다. 실험조건은 기체의 유량 0.00223kg/s, 압력0.23MPa, 사출압 3MPa, 보압5MPa, 형체력8.50MPa으로 충돌 제트의 출구온도를 제외하고 모두 동일하게 설정하였다.

4.2 표면온도 추정

표면온도를 추정하기 위해 금형을 반무한고체로 가정하여 열전도 문제를 풀어 표면온도를 계산하였다. 이때 반무한 고체의 표면은 대류열전달에 의해 가열되는데 표면에서 대류열전달계수 h와 주위온도 T_∞를 경계조건으로 적용하여야 한다[9].

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

여기서 α는 금형의 열확산계수이고 T_i는 가열전의 금형의 초기온도이다. 또한 모든 물성은 막온도에서 계산하기로 한다.

Martin[10]이 제시한 충돌제트의 단일 원형노즐에 대한 관계식을 이용하여 대류열전달계수를 구하였다. 고온의 제트를 이용하여 저온의 표면을 가열하는 경우에는 주변의 찬 공기의 유입현상(entrainment)[11]이 발생하므로 이를 고려하기 위하여 단열벽면온도(adiabatic wall temperature)를 계산하여 이를 주위온도 T_∞로 사용하였다. 노즐출구온도, 가열시간에 따른 표면온도를 계산하였다. 이때 제트와 주변의 찬공기와의 온도차가 크고 공기의 정지 열에너지가 크므로 제트의 동온도(dynamic temperature)에 의한 효과(recovery effect)를 무시할 수 있다.

표면온도를 추정의 정확성을 확인하기 위하여

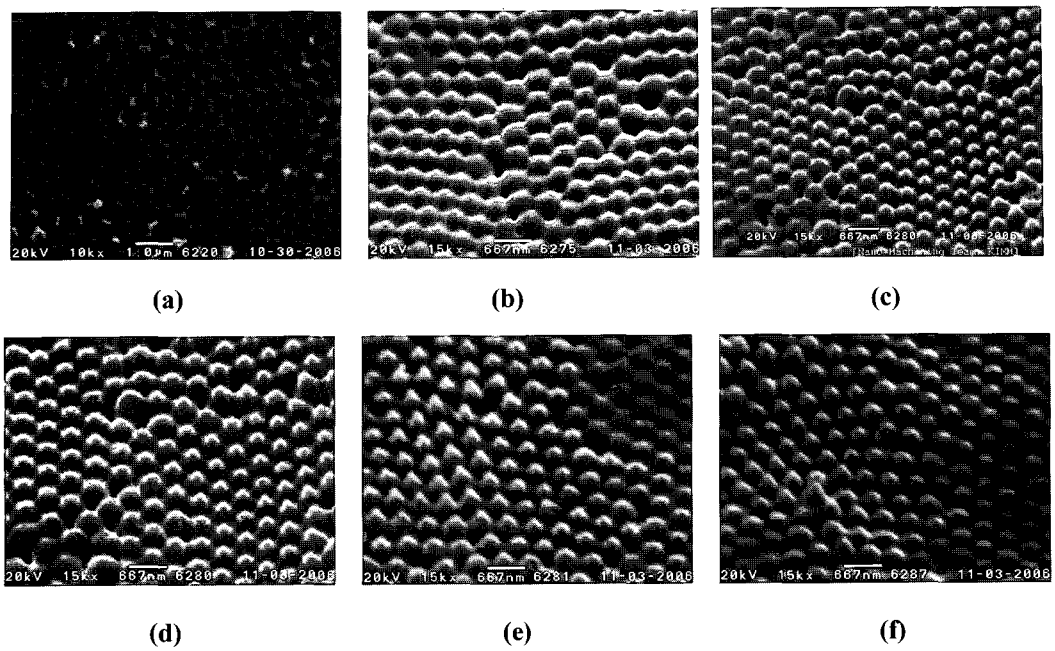


Fig. 3 (a) SEM image of AAO stamper and SEM images of transcribed surface with hot jet of (b)180°C, (c) 210°C, (d) 250°C, (e) 280°C and (f) 330°C

열전대 2 번에서 측정된 온도와 그 지점에서 계산된 온도를 비교하였다.

4.3 실험 방법

본 연구에서는 금형 형개시 노즐을 스템퍼가 위치된 인장시편의 중앙부에 국부적으로 가열 시킬 수 있도록 설정하였다. 또한 이 부분은 유동선단의 수지가 만나는 부분이므로 금형온도에 따른 웰드라인의 유무를 확인할 수 있을 것이라 판단된다.

히터에 공급되는 전력을 변화시켜 가면서 일정한 질량유량 상태에서 공정을 수행하였다. 금형이 열려 있을 때 일정시간 동안 가열하고 금형을 닫은 후 사출 공정을 수행한 후 사출품을 관찰하여 평가 하였다.

5. 실험결과

고온 제트를 분사하는 동안 Fig. 2(a)의 0 번과 2 번 측정 지점의 온도분포, 인장시편중앙부의 추정표면온도 및 Fig.3 의 SEM 사진을 실험변수인 노즐 출구 온도에 따라 나타내었다. 가변 변압기를 이용해 전력을 조절하여 기체온도를 변화시켰다.

전력이 1382W(28.8V, 48A)일 때 노즐출구온도는 180℃였고 금형표면을 40 초동안 가열하였다. 인장시편 금형의 중심에 실장된 열전대 2 번의 온도가 43℃로 측정되었고 이론식으로는 43.2℃로 계산되었다. 이를 근거로 표면온도는 45.6℃로 예측되었다. Fig. 3(b)는 사출제품의 표면을 SEM 으로 촬영한 것이며 스템퍼의 형상이 제대로 구현되지 않음을 관찰할 수 있었다. 그리고 웰드라인을 육안으로 확인 할 수 있었다.

전력이 2189W(34.2V, 64A)일 때 노즐출구온도는 210℃였다. 이때 금형에 실장된 열전대 2 번의 온도는 47℃로 측정되었고 이론식으로는 47.8℃로 계산되었다. 표면온도는 49.5℃로 예상된다. 전사된 패턴의 SEM 영상을 Fig. 3(C) 에서 볼 수 있다. 노즐 출구 온도가 180℃인 이전 경우와 비교하여 스템퍼의 형상에 더 근접함을 관찰할 수 있었다. 금형의 표면온도 상승으로 전사성이 향상된 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 웰드라인을 육안으로 확인 할 수 없었다.

전력이 2755 W(38.8V, 71A)일 때 노즐의 출구 온도는 250℃로 측정되었으며 금형에 실장된 열전대 2 번의 온도는 51℃로 측정되었고 이론식으로는 51.4℃로 계산되었다. 이를 근거하여 금형표면

Table 1 Test cases and measured temperatures

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Power Input(W)	1382	2189	2755	3432	4368
Nozzle Air Temp.(°C)	180	210	250	280	330

온도는 54.1℃로 판단된다. 패턴의 SEM 영상은 Fig. 3(d)에서 볼 수 있듯이 노즐출구온도가 210℃와 크게 다르지 않음을 관찰할 수 있었다.

전력이 3432W(44V, 78A)일 때 노즐출구 온도는 280℃로 측정되었다. 금형에 실장된 열전대 2 번의 온도는 54℃로 측정되었고 이론식으로는 54.6℃로 계산되었다. 또한 표면온도는 57.7℃로 예상된다. 전사 결과를 Fig. 3(e)에 도시하였다.

전력이 4368W(48V, 91A)일 때 노즐출구 온도는 330℃로 측정되었다. 전사 결과를 Fig. 3(f)에 도시하였다. 전사부분에 뾰족한 돌기부를 관찰할 수 있는데 이를 통해서 전사된 높이가 근소하게 상승하였음을 예측할 수 있었다. 비록 스템퍼의 형상으로 제대로 성형이 되지 않았지만 노즐출구온도가 상승함에 따라 전사높이가 상승함을 SEM 영상을 통해 관찰할 수 있었고 금형온도와 전사성이 관련이 있음을 예측할 수 있었다. 또한 금형에 실장된 열전대의 온도는 57℃로 측정되었고 이론식으로 57.7℃로 계산되었다. 금형표면온도는 61.6℃로 계산되었다.

전체 공정 조건과 측정 값들은 위에 언급한 5 가지 경우에 대하여 Table 1에 정리되어 있다. Fig. 4는 금형을 반무한고체라 가정하고 충돌제트의 단열벽면온도를 고려하여 금형깊이에 따른 온도분포를 Case별로 그래프로 도식화 한 것이다. 공정이 가능한 최대 온도 까지 표면온도를 상승시켜 공정을 수행하여 평가하는 것이 추가로 필요하다.

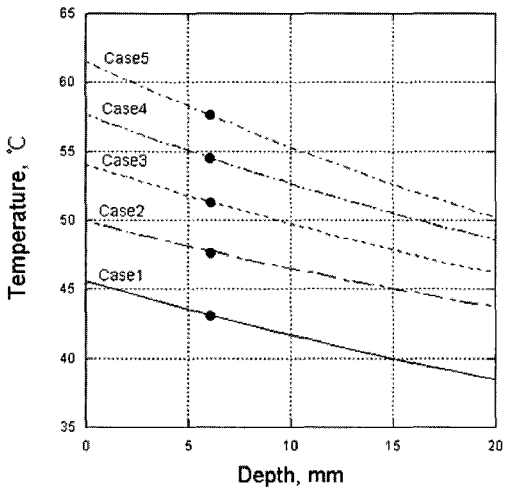


Fig. 4 Calculated and measured temperature at 40s

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 사출성형공정에서의 가열방식을 대신하여 제트분사라는 새로운 가열방식을 적용하여 금형의 표면과 내부에서 온도 이력을 측정하고 제품의 전사성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제트분사는 열전달계수를 향상시켜 단시간에 금형표면온도를 올릴 수 있었고 본 연구에서 제안하는 가열방식을 적용할 경우 성형 시간을 단축 시킬 수 있는 가능성을 확인하였다. 이는 기존의 화염, 적외선, 열선, 고주파를 이용한 방법에 비해 보다 제어가 쉬운 형태로 사용 가능하다는 장점이 있다. 금형 내부 구조의 변경도 최소화 할 수 있다.

(2) 분사 시 노즐의 온도가 상승함에 따라 웰드라인이 제거 및 광택의 향상 또한 육안으로 확인할 수 있었다.

(3) 노즐온도의 상승에 따라 사출품에 나노패턴의 전사된 상태의 높이가 향상됨을 관찰할 수 있었다.

(4) 국부적으로 가열하는 방식을 채택하여 필요한 부분만 선택적으로 집중 가열할 수 있다. 전체적으로 가열하여 생기는 부작용을 최소화 할 수 있다.

(5) 향후 고도의 전사성이 요구되는 사출성형제품에 광범위하게 적용이 가능할 것으로 기대된다. 또한 장비의 구조가 비교적 간단하고 제작이 쉬워 큰 비용투자 없이 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 "대면적 미세형상의 초정밀/지능화 가공원천 기술 개발"사업의 일환으로 수행하였습니다.

참 고 문 헌

[1] http://www.onosg.co.jp/technology/images/RHCM_E.pdf, Ono Sangyo.

[2] 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.

[3] 김동학, 김태완, 2003, 사출성형공정을 이용한 미세패턴을 갖는 플라스틱 부품 제작에 관한 연구, 한국산학기술학회논문지, 제 4 권 3 호, pp. 167~168.

[4] P. C. Chang, S. J. Hwang, 2006, Experimental investigation of infrared rapid surface heating for injection molding. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 102, No. 4, pp. 3704~3713.

[5] S. C. Chen, W. R. Jong, J. A., 2006, Chang, Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 101, No. 2, pp. 1174~1180.

[6] K. M. B. Jansen, A. A. M. Flaman, 1994, Construction of Fast-Response Heating Elements for Injection-Molding Applications. Polymer Engineering and Science, Vol. 34, No. 11, pp. 894~ 897.

[7] K. M. B. Jansen, 1995, Heat-Transfer in Injection-Molding Systems with Insulation Layers and Heating Elements. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No. 2, pp. 309~316.

[8] D. G. Yao, B. Kim, 2004, Scaling issues in miniaturization of injection molded parts. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme, Vol. 126, No. 4, pp. 733~739.

[9] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, 1959, Conduction of heat in solids, Oxford: Clarendon Press, 2nd ed.

[10] H. Martin, 1997, Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surface, in J. P. Hartnett and T. F. Irvine, Jr., Eds., Advances in Heat Transfer, Vol. 13, Academic Press, New York.

[11] 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.