

선택적 유도가열을 사용한 사출금형의 국부가열기술

도범석* · 박정민* · 엄혜주** · 박근†

Local Heating of an Injection Mold using Selective Induction Heating

Bum-Suk Do, Jung-Min Park, Hye-Ju Eom, and Keun Park

Key Words : Injection Molding(사출성형), Induction Heating(유도가열), Rapid Mold Heating(급속 금형가열), Local Heating(국부가열), Micro Molding(미세형상성형)

Abstract

High-frequency induction is an efficient way to heat mold surface by electromagnetic induction in a non-contact procedure. It has been recently applied to the injection molding of thin-walled parts or micro/nano structures. Though the induction heating has an advantage in terms of its rapid-heating capacity on the mold surface, it still has difficulty in efficient mold temperature control due to the restriction of an induction coil design suitable for the given mold shape. The present study proposed a localized mold heating method by means of selective use of mold material. For localized induction heating, an injection mold composed of ferromagnetic material and paramagnetic material is used. The electromagnetic induction concentrates on the ferromagnetic material, from which we can selectively heat for the local mold elements. The feasibility of the proposed heating method is investigated through an experimental measurement in terms of the heating efficiency on the localized mold surface.

1. 서론

사출성형시 용융된 고분자수지가 고온, 고속으로 금형 내부로 분사되고, 금형 내부를 채우며 성형이 이루어진다. 사출성형 과정에서 고온의 수지와 상대적으로 온도가 낮은 금형 벽면간의 열전달이 발생하면서 금형과 인접한 부분에서는 급속하게 온도가 저하되어 수지의 응고가 진행된다. 이러한 고화층(frozen layer)의 생성은 수지 유동의 저하를 초래하여 성형품의 두께가 얇은 경우 미성형(short shot)을 유발하고,⁽¹⁾ 성형품 표면에 이방성을 유발하여 잔류응력 및 복굴절(birefringence)의 원인이 되기도 한다.⁽²⁾

사출성형시 발생하는 고화층을 제거하기 위해 금형을 유리전이 온도 이상으로 가열하는 방법이 연구되었는데,^(3,4) 이는 금형의 가열과 냉각에 소요되는 시간이 상대적으로 길어 생산성이 저하되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 사출금형에 고주파 전류를 인가할 때 발생하는 근접효과(proximity effect)를 이용하여 급속으로 금형을 가열함으로써 박육 사출성형의 유동특성을 개선하기 위한 실험적인 연구가 수행되었다.⁽⁵⁾ 그밖에 화염을 사용한 방법⁽⁶⁾이나 MEMS Heater 를 사용한 방법,⁽⁷⁾ 적외선 가열을 사용한 방법⁽⁸⁾ 등 다양한 금형가열 방법에 관한 연구가 진행되었다.

최근에는 금형 구조의 변경 없이 비접촉 형태로 가열이 가능한 고주파 유도가열(High-frequency induction heating)을 적용하여 사출금형의 표면만을 급속으로 가열하기 위한 연구가 진행되어왔다. Chen 등은 고주파 유도가열을 사용하여 마이크로형상 사출성형⁽⁹⁾ 및 웰드라인 제거⁽¹⁰⁾에 활용하였고, Kim 등⁽¹¹⁾은 도광판 나노 패턴의 성형성 향상

† 회원, 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

E-mail : kpark@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6358 FAX : (02)974-8270

* 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부 원

** 서울산업대학교 에너지환경경대학원

을 위해 고주파 유도가열을 적용하였다. 또한 Park 등⁽¹²⁾은 마이크로 치형을 포함한 박육 제품의 성형에 고주파 유도가열 기술을 적용하였다.

고주파 유도가열은 가열코일 및 피가열체인 금형의 형상에 따라 가열부위의 범위가 결정되는데, 일반적으로 금형 표면 전역의 온도가 상승하게 되어 가열효율이 저하되고, 결과적으로 전력소모에 의한 생산비가 증가하는 단점이 있다. 본 연구에서는 전술한 단점을 개선하기 위해 재료의 선택적 사용에 의한 금형의 국부가열기법을 개발함으로써 가열효율을 제고하고자 한다.

2. 고주파 유도가열 시스템

2.1 고주파 유도가열의 원리

고주파 유도가열은 교번자계 내부에 놓여있는 도전성 물체 내에 발생하는 와전류손 또는 히스테리시스손을 이용하여 피가열체를 가열시키는 방식이다. 피가열체가 도체인 경우 고주파 유도가열에 의해 피가열체의 표면에 와전류(Eddy current)가 유도되고 이로 인한 저항 손실에 의해 표면에 열이 발생된다. 따라서 피가열체에 에너지를 짧은 시간에 인가할 수 있으므로 급속 가열이 가능하고 표면층만을 가열할 수 있다는 장점이 있다.

도체에 고주파전류가 흐를 경우 표면에 내부보다 많은 양의 전류가 흐르는 현상이 발생하는데, 이를 표피 효과(Skin effect)라 한다. 표피 효과에 의해 전류가 표면의 $1/e(36.8\%)$ 만큼 감소하는 침투 깊이(penetration depth)는 아래와 같이 정의된다.⁽¹³⁾

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (1)$$

여기서 σ 는 도체의 비저항율(resistivity), f 는 주파수, μ_0 과 μ_r 는 각각 진공의 투자율(permeability) 및 피가열체의 상대투자율에 해당한다.

2.2 고주파 유도가열 시스템 구성

본 연구에서는 사출금형의 급속가열을 위한 고주파 가열 시스템을 구축하였다. 구성 요소를 살펴보면 고주파 가열기, 가열코일, 코일이 연결된 보조 컨트롤 박스, 냉각장치 및 데이터 처리장치로 구성된다. 실험에 사용된 고주파 가열기는 (주)백마고주파의 BMHF-P227 모델을 사용하였으며, 출력전력은 최대 15 kW 이다.

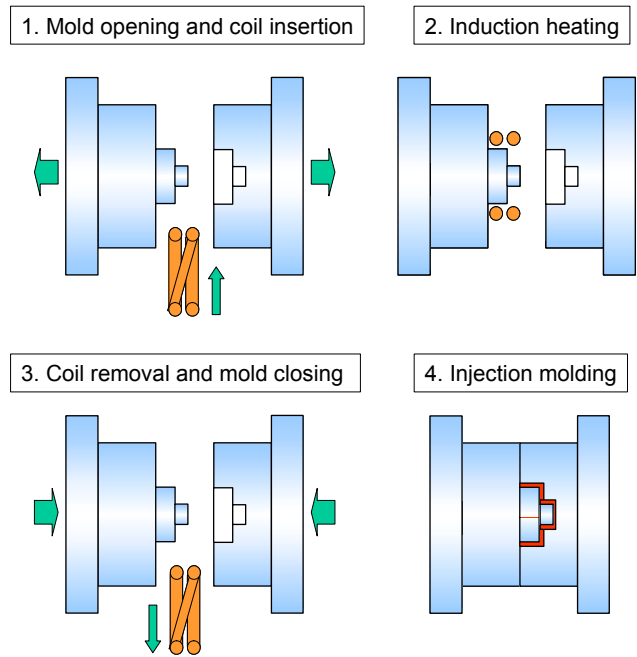


Fig. 1 Induction heating procedure for rapid heating of an injection mold⁽¹²⁾

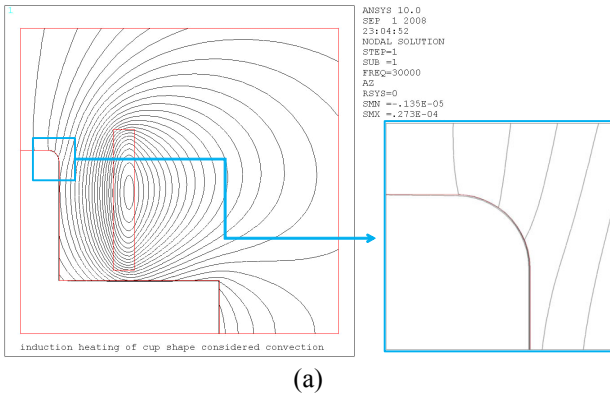
실험장치는 고주파가열기 및 보조 컨트롤 박스를 이동식 프레임에 장착하여 사출성형기에 삽입이 가능하도록 구성하였다. Fig. 1 에 사출금형 가열을 위한 유도가열 과정을 도시하였다. 금형이 열린 상태에서 가열코일을 삽입하여 코어부분 주변에 위치시킨 후 가열을 실시한다. 가열이 완료된 후 코일을 제거하고 금형을 닫은 후 사출을 실시한다. 이때 코일 제거로부터 사출시까지 1.0~1.5 초 정도의 시간이 소요된다.⁽¹²⁾

2.3 재료물성에 따른 유도가열 특성 비교

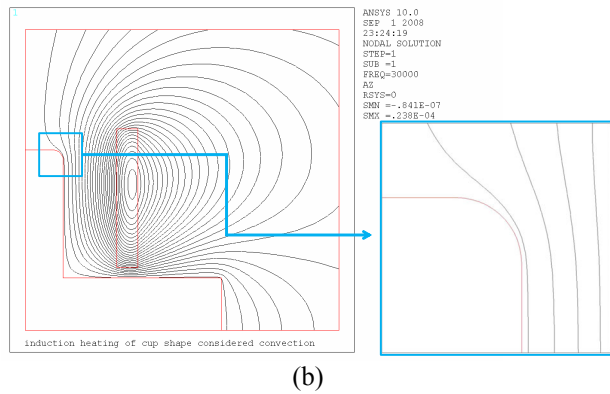
재료물성에 따른 유도가열의 특성을 비교하기 위해 강자성재료인 탄소강(S45C)과 상자성재료인 알루미늄 합금(AL7075)에 대한 유도가열 해석을 실시하였다. Table 1에 재료의 열-전자기적 물성을 비교하였다. 해석은 ANSYS™를 사용하여 전자기장 해석과 열전달 해석을 연계하여 수행하였다.⁽¹³⁾

Table 1 Comparison of thermal and electric properties

Material	S45C	AL7075
Material Density (kg/m ³)	7.87	2.81
Specific heat (J/kg-K)	486	960
Thermal conductivity (W/m-K)	51.9	173
Resistivity (x 10 ⁻⁶ Ω-m)	0.162	0.038
Relative permeability	200	1.0



(a)



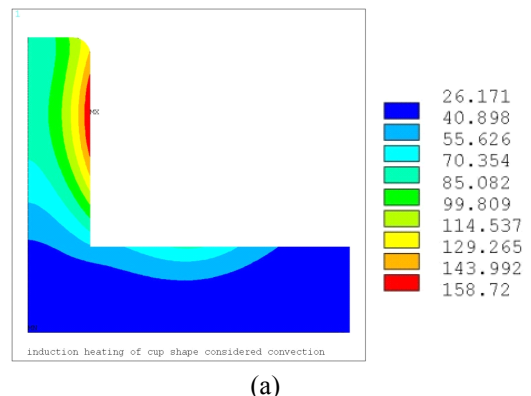
(b)

Fig. 2 Distribution of the magnetic flux lines for (a) S45C and (b) AL7075 mold

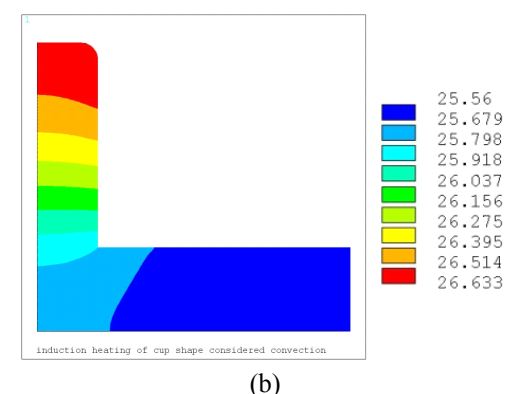
피가열체는 직경 30mm, 높이 50mm 의 원통형 금형이며, 이를 직경 70mm 로 권선된 구리 코일이 둘러싸고 있다. 코일 단면의 외경은 8mm 이며, 총 6회 권선되어 있다. 경계 조건으로는 코일에 400A, 30kHz 의 고주파 전류를 4초간 인가하였다.

Fig. 2에 전자기장해석 결과로부터 얻어진 자속선(flux line)의 분포를 도시하였다. S45C 금형의 경우(Fig. 2 (a)) 코일에서 발생된 자기장이 금형 표면에 흡수됨을 알 수 있는데, 흡수된 교변자장은 결과적으로 표면부위에 와전류를 형성하여 표면의 온도 상승을 유발하게 된다. 반면에 AL7075 금형의 경우(Fig. 2 (b)) 코일에서 발생된 자기장이 금형 표면에 흡수되지 못함을 알 수 있다.

Fig. 3에 4초간 유도가열을 실시한 직후의 금형의 온도분포를 도시하였다. S45C 금형의 경우(Fig. 3 (a)) 금형 측면부 표면에서 최대 158.7℃까지 상승되는 것으로 나타나 일반적인 고분자 수지의 유리전이온도 이상으로 가열됨을 확인할 수 있었다. 반면에 AL7075 금형의 경우(Fig. 3 (b)) 코일에서 발생된 자기장이 금형표면에 흡수되지 못함에 따라 온도상승이 최대 26.6도로 저조하여, 유도가열의 효과가 미미함을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 3 Temperature distribution at the end of heating for (a) S45C and (b) AL7075 mold

3. 선택적 유도에 의한 국부가열 시스템

3.1 재료의 선택적 사용에 의한 국부가열

고주파 유도가열시 피가열체의 자기적 특성에 따라 가열효율에 많은 차이가 발생하는데 자성체의 경우 시변자장의 영향을 크게 받아 비자성체에 비해 많은 와전류가 유도된다. 특히 식 (1)에서 알 수 있듯이 자성재료의 경우 상대투자율의 증가로 인해 침투깊이가 얇아져 비자성체에 비해 표면가열의 효율이 더욱 증대된다.

본 연구에서는 상기 특성을 이용하여 재료를 선택적으로 사용함으로써 금형을 국부적으로 가열할 수 있는 선택적 유도가열 기법을 개발하였다. Fig. 4에 선택적 유도가열기법의 개념도를 도시하였다. 금형 형판은 상대투자율이 1에 가까운 알루미늄 합금을 사용하였고, 가열부위에 상대투자율이 200인 탄소강을 사용하여 인서트물을 삽입하였다. 2.3절에서 고찰한 바와 같이 투자율이 높은 탄소강이 알루미늄 합금에 비해 유도가열 효과가 월등히 높아 결과적으로 탄소강 인서트부위에 유도전류가 집중되어 금형표면의 국부적인 가열이 가능하다.

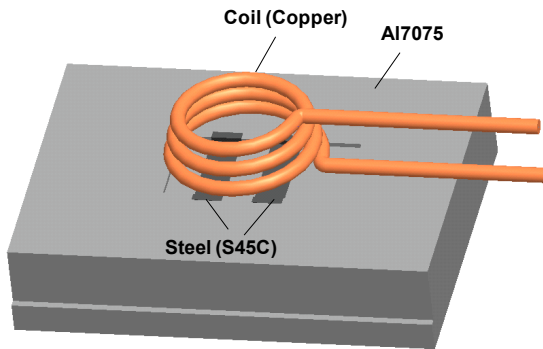


Fig. 4 Schematic description of the selective induction heating system

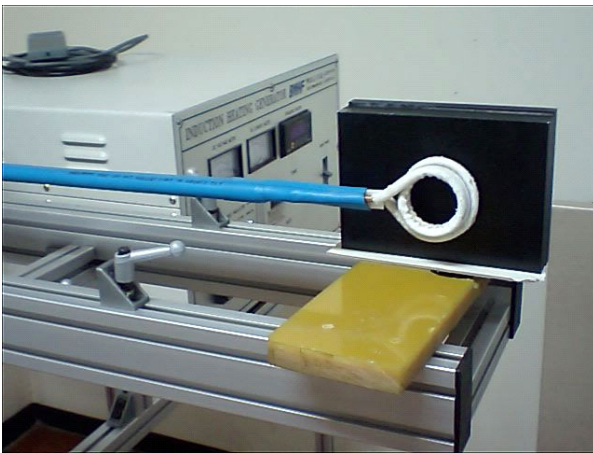


Fig. 5 Experimental setup for the induction heating

3.2 가열부위에 따른 온도변화 고찰

앞절에서 기술한 바와 같이 이종재료로 구성된 사출금형의 코어 플레이트를 대상으로 Fig. 5와 같이 고주파 유도가열 실험을 실시하였다. 고주파 가열기의 출력은 2.5kW로 설정하였고, 160kHz의 주파수로 3초동안 7회에 걸쳐 가열하였다. Fig. 6에 금형의 고주파가열 직후에 열화상카메라로 측정된 온도분포를 도시하였다. 온도분포를 관찰하면 상대적으로 투자율이 높은 S45C 주변에서 온도상승이 집중되어 국부가열의 효과를 확인할 수 있었다.

재료의 선택적 사용을 통한 국부가열의 효과를 고찰하기 위해 Fig. 7에 가열방법(전체가열 및 국부가열)에 따른 금형 중앙부 표면에서의 온도 프로파일을 비교하였다. 전체가열의 경우 탄소강으로 제작된 평판을 대상으로 가열을 실시하였고, 코일 주변의 온도가 최대 90℃까지 상승하였음을 알 수 있다. 반면에 재료를 선택적으로 사용한 경우 탄소강 삽입부의 온도가 집중적으로 상승하고 최대 200℃까지 도달하여 국부가열의 효과를 확인할 수 있었다.

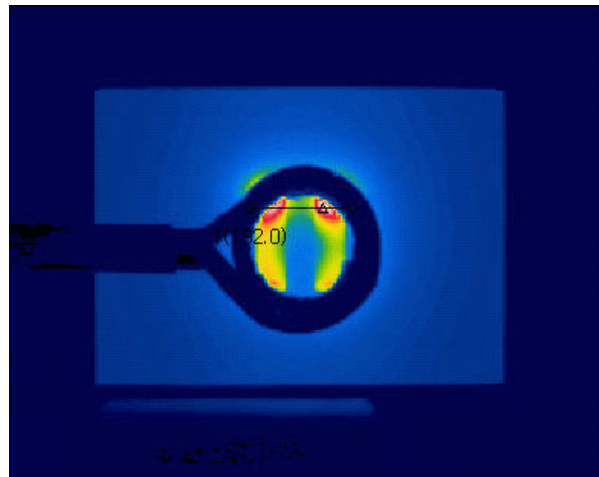


Fig. 6 Temperature distribution at the end of heating

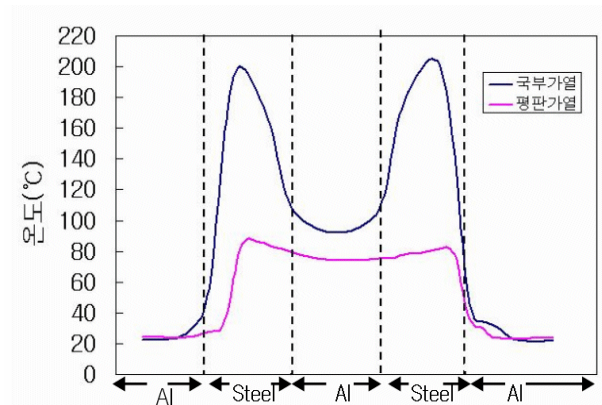


Fig. 7 Comparison of the sectional variations of temperature according to heating methods

4. 결론

본 연구에서는 이종재료를 사용한 선택적 유도가열 기법을 적용하여 사출금형의 국부가열 기술을 개발하였다. 이러한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 전자기-열 연계 유한요소해석을 사용하여 고주파 유도가열 해석을 수행하였고, 해석 결과로부터 상자성재료인 알루미늄 합금에 비해 강자성재료인 탄소강의 가열효과가 확연히 높음을 확인하였다.

(2) 해석결과를 바탕으로 유도가열 효과가 높은 탄소강을 알루미늄합금 형판에 삽입하여 국부적인 유도가열이 가능한 선택적 금형가열 구조를 제시하였다.

(3) 이종재료를 사용한 금형을 사용하여 선택적 유도가열 실험을 실시한 결과 단일 재료를 사용한

경우에 비하여 동일한 가열조건에서 최대온도가 2 배 이상 상승하는 효과를 보임을 확인하였다.

상기 연구결과로부터 향후 초박육 사출성형, 초 미세 사출성형 등의 고부가가치 성형기술에 선택 적 유도가열 을 적용하여 성형성을 향상시킬 수 있을 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부· 지식경제부의 출연 금으로 수행한 산학협력중심대학 육성사업의 연구 결과로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Park, K., Kim, B. and Yao, D., 2006, "Numerical simulation for injection molding with a rapidly heated mold, Part I: Flow simulation for thin wall parts," *Polym. Plast. Technol. Engng.* Vol. 45, pp. 897-902.
- (2) Park, K., Kim, B. and Yao, D., 2006, "Numerical simulation for injection molding with a rapidly heated mold, Part II: Birefringence prediction," *Polym. Plast. Technol. Engng.* Vol. 45, pp. 903-909.
- (3) Kim, B. H. and Suh, N. P., 1986, "Low thermal inertia molding," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 25, pp. 73-93.
- (4) Jansen, K. M. B. and Flaman, A. A. M., 1994, "Construction of fast-response heating elements for injection molding applications," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 34, pp. 894-897.
- (5) Yao, D. and Kim, B., 2002, "Increasing flow length in thin wall injection molding using a rapidly heated mold," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 415, pp. 819-832.
- (6) Kim, D. H., Kang, M. H., and Chun, Y. H., 2001, "Development of a new injection molding technology: Momentary mold surface heating process," *J. Injection Molding Tech.*, Vol. 5, pp. 229-232.
- (7) Kim, Y., Choi, Y., Kim, Y. J., and Kang, S., 2005, "Construction of injection mold with MEMS RTD sensor and MEMS heater for micro/nano molding process," *Jap. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, pp. 3591-3595.
- (8) Chang, P. C. and Hwang, S. J., 2006, "Experimental investigation of infrared rapid surface heating for injection molding," *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 102, pp. 3704-3713.
- (9) Chen, S. C., Jong, W. R., Chang, Y. J., Chang, J. A., and Cin, J. C., 2006, "Rapid mold temperature variation for assisting the micro injection of high aspect ratio micro-feature parts using induction heating technology," *J. Micromech, Microeng.*, Vol. 16, pp. 1783~1791.
- (10) Chen, S. C., Jong, W. R., and Chang, J. A., 2006, "Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance on weld line," *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 101, pp. 1174-1180
- (11) S. Kim, C. S. Shiau, B. Kim, and D. Yao, 2007, "Injection molding nanoscale features with the aid of induction heating," *Polym Plast Tech Eng*, Vol.46, pp. 1031-1037.
- (12) Park, K., Choi, S., Lee, S. J. and Kim, Y. S., 2008, "Injection molding for a ultra thin-wall part using induction heating," *Trans. J. Kor. Soc. Mech. Engng. (A)*, Vol. 32, pp. 95-102.
- (13) Park, K., Hwang, J. J., Kwon, O. K. and Yun, J. H., 2007, "Finite element analysis of induction heating process for development of rapid mold heating system," *Trans. Mat. Proc.*, Vol. 16, pp. 113-119.