

< 논문 >

고주파 유도가열을 사용한 급속 금형가열에 관한 연구

권오경[†] · 정희택^{*} · 윤재호^{*} · 박 근^{**}

(2006년 12월 11일 접수, 2007년 4월 24일 심사완료)

A Study on Rapid Mold Heating System using High-Frequency Induction Heating

Oh-Kyung Kwon, Hui-Tack Jeong, Jae-Ho Yun and Keun Park

Key Words: Induction Heating(유도가열), Injection Molding(사출금형), Rapid Mold Heating(급속 금형가열), Thin Wall Molding(박육 사출성형), Vortex Tube(볼텍스 튜브)

Abstract

Rapid mold heating has been recent issue to enable the injection molding of thin-walled parts or micro/nano structures. Induction heating is an efficient way to heat a conductive workpiece by means of high-frequency electric current caused by electromagnetic induction. Because the induction heating is a convenient and efficient way of indirect heating, it has various applications such as heat treatment, brazing, welding, melting, and mold heating. The present study covers an experimental investigation on the rapid heating using the induction heating and rapid cooling using a vortex tube in order to eliminate an excessive cycle time increase. Experiments are performed in the case of a steel cup mold core with various heating and cooling conditions. Temperature is measured during heating and cooling time, from which appropriate mold heating and cooling conditions can be obtained.

1. 서 론

컴퓨터나 휴대폰과 같은 전자 제품 시장에서의 소비자의 요구가 날로 소형화, 경량화 되어감에 따라서 박육 사출성형(Thin-wall injection molding) 및 성형 기술에 대한 필요성이 한층 더 요구되고 있다. 박육 사출성형은 일반적으로 제품의 두께가 1mm이하이거나 유동길이와 두께의 비율이 100:1 이상인 제품으로 정의된다.⁽¹⁾

박육 사출성형의 응용분야로는 CD, DVD 등의 레이저디스크, 전자기기용 커넥터, IC카드 등이 가장 대표적인 예로 들 수 있으며, 이외에도 노

트북 컴퓨터나 휴대용 전화기의 케이스와 같은 모바일 정보기기의 동체 등에 있어서도 성형성, 제품의 강도 등을 고려한 박육화가 다양한 각도에서 검토되어지고 있다.

박육 사출성형에서 문제가 될 수 있는 부분은 미성형, 휨, 뒤틀림 등으로 나눌 수 있고 그 중에서도 가장 최근에 연구가 집중되고 있는 부분이 미성형부분이다.

일반적으로 사출성형 과정에서 고온의 수지 내부에서 상대적으로 온도가 낮은 금형면으로 열전달이 발생하고, 금형과 인접한 부분에서는 급속하게 온도가 저하되어 수지의 응고가 진행된다. 이 때 응고된 층의 두께는 일반적으로 편측 0.25mm 정도로 알려져 있다.⁽²⁾ 이러한 응고층의 두께는 보통 전체두께에 비해 상대적으로 적은 부분으로 전체적인 유동에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 두께가 매우 얇은 제품의 경우 응

[†] 책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

E-mail : kwonok@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8528 FAX : (041)589-8330

^{*} 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

^{**} 회원, 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

고층의 상대적인 비율이 증가하게 되고, 결과적으로 수지 유동의 저하를 초래하며 심한 경우 미성형(Short shot)이 유발될 가능성이 높다. 예를 들어 두께 1mm의 제품인 경우 응고층의 총 두께는 0.5mm로 전체의 50%만이 유효 두께에 해당되어 수지의 유동특성이 현저하게 저하된다.

박육 사출성형의 유동특성을 개선하기 위해 높은 사출압력 및 사출속도, 낮은 점성의 수지 사용, 강건한 구조의 금형설계 등이 적용되고 있는데,⁽¹⁾ 이러한 특화된 공정조건은 사출성형기, 수지, 금형구조 등에 많은 제약이 뒤따른다. 그밖에 금형을 유리전이 온도 이상으로 가열하여 수지의 응고를 완화시킴으로써 유동특성을 개선하는 방법이 연구되었는데,^(3,4) 이는 금형의 가열과 냉각에 소요되는 시간이 상대적으로 길어 생산성이 저하되는 문제점이 있다. Yao와 Kim은 이러한 문제점을 극복하기 위해 1초에 100℃ 이상의 속도로 금형을 가열하는 급속 가열 사출성형(Rapid thermal response molding; RTR molding) 공정을 개발하였으며,^(5,6) 이를 적용하여 박육 사출 성형의 유동특성을 개선하기 위한 실험적인 연구를 수행하였다. 또한 박육 사출성형에서의 유동특성을 수치적으로 묘사하기 위한 연구 등이 진행되고 있으며,^(7,8) 최근들어 고주파 유도가열(Induction heating)을 사용하여 사출금형의 표면만을 급속으로 가열함으로써 성형성을 향상시키기 위한 연구도 진행되고 있다.⁽⁹⁻¹²⁾

본 연구에서는 복잡한 금형형상에 적용하기에 앞서 컵형상의 금형코어를 제작하고 실험을 통하여 급속 가열 기법으로 고주파 유도가열기를 사용하고 급속 냉각 기법으로 자연대류, 압축공기 및 불텍스 튜브를 사용하여 금형코어의 온도특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 급속가열 및 냉각 특성

일반적으로 금형을 가열하는데 사용되는 방법은 히터를 사용하거나 화염을 직접 금형에 분사하여 유동특성을 향상시키는 방법들이다. 이런 방법들은 입열량의 정확한 제어와 추정이 어려워 자동화에 적합하지 않고, 냉각에 시간이 오래 걸리며, 화염을 분사하는 방법은 제품의 표면에 그을음이 남아 도색을 필요로 하는 등 제품품질에

도 나쁜 영향을 미친다.

고주파 유도가열은 교번자계 내부에 놓여있는 도전성 물체 내에 발생하는 와전류손 또는 히스테리시스손을 이용하여 피가열체를 가열시키는 방식이다. 피가열체가 도체인 경우 고주파 유도 가열에 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. 이러한 장점으로 인해 초기에는 금속을 용해시키는 목적으로 사용되어 왔으며, 최근에는 주조, 열간단조, 열처리 등 다양한 금속가공에 이용되고 있다. Fig. 1에 고주파 유도가열의 기본 원리를 도시하였다.

고주파유도가열은 고주파 전류가 도체에 흐를 때 전류가 도체 표면 가까이 집중하여 흐르는 현상, 즉 표피 효과(Skin effect)가 발생한다. 급속 가열 사출성형 시스템은 이러한 표피 효과를 이용하여 금형의 표면만을 순간적으로 가열하는 방법이다. 금형 표면만이 순간적으로 가열되기 때문에 금형의 냉각에 소요되는 시간도 여타 금형 가열방법에 비하여 크게 감소하여, 생산성을 저하시키지 않으면서도 유동특성을 향상시킬 수 있다.⁽⁵⁾

또한 성형 사이클에서 가장 많은 시간이 소요되는 과정은 냉각과정이다. 이 냉각시간을 좌우하는 중요한 요소가 금형온도이며, 사출이 끝난 후 급속하면서도 균일하게 금형을 냉각시켜 주게 되면 생산성을 크게 향상시킬 수 있다.

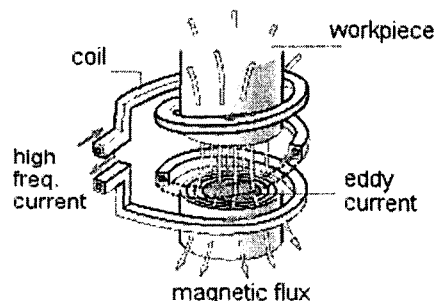


Fig. 1 Schematic description of induction heating

본 연구에서 급속냉각에 사용된 볼텍스 튜브는 Fig. 2에서와 같이 상온의 압축공기를 튜브내부의 제너레이터에 의해 강제적으로 소용돌이를 발생시켜 중심부의 찬공기와 가장자리의 더운공기로 분리시키는 에너지 분리장치이다. 볼텍스 튜브는 상온보다 차가운 공기를 분사시킴으로 인해서 금형코어를 급속 냉각하여 사이클타임을 줄일 수 있는 장점이 있다.

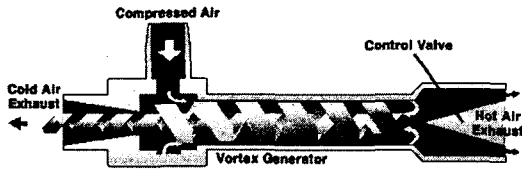


Fig. 2 Schematic view of a vortex tube

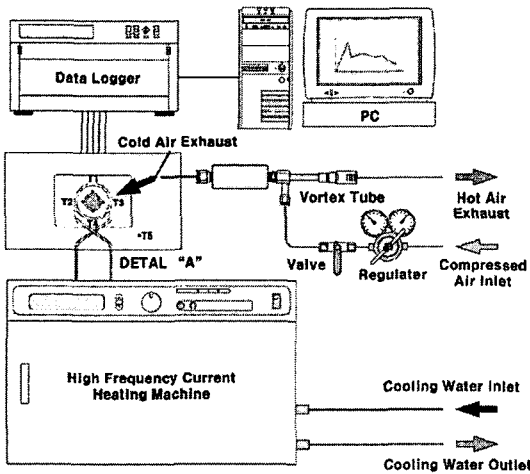


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

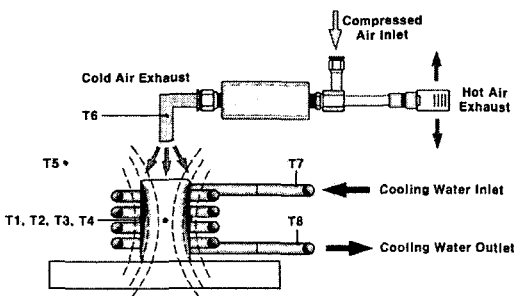


Fig. 4 Schematic diagram of test section

2.2 급속가열 및 냉각 실험장치

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 4는 테스트섹션부를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 고주파 가열기, 테스트섹션, 냉각장치(압축공기, 볼텍스튜브) 및 데이터 처리장치로 구성된다. 실험에 사용된 고주파 가열기는 (주)피에스텍 PSIH-15MF모델을 사용하였으며 출력전력 15 kW이며 수냉식이다. 테스트 섹션부는 외경 42.3 mm의 금형코어 중앙위치 표면에 90° 간격으로 4개의 K-type 열전대(Thermocouple)를 홈을 파서 고정되도록 설치하여 온도를 측정하였다. 결과에 사용된 온도값은 4점의 평균값을 사용하였다. 금형의 코어 플레이트는 탄소강으로 제작하였으며 그 크기는 가로 150mm, 세로 110mm, 높이 20 mm이다. 또한 컵형상의 금형코어 주위에는 유도가열 코일을 설치하였다. 유도가열 코일은 직경 8 mm의 다프피치동으로 제작되었으며 내경 70 mm의 원으로 6 권 감겨있다.

급속냉각 방법에는 7 kg/cm²으로 불어지는 압축공기, 볼텍스튜브(Exair 3215)를 사용하여 그 결과를 비교하고자 하였으며, 데이터 처리장치는 일본 Yokogawa사의 MV200을 사용하여 데이터를 취득하였다.

Table 1 Heating conditions

| | |
|--------------------------------|--------------------|
| Ambient temperature (°C) | 29 |
| Initial temperature (°C) | 29 |
| Frequency (kHz) | 30 |
| Heating current (A) | 100, 200, 300, 400 |
| Coil diameter / thickness (mm) | 8 / 1.2 |
| Heating time (sec) | 4 |
| Cooling water temp. (°C) | 18 |

Table 2 Cooling conditions

| | |
|----------------------------|---------------------|
| Type of cooling | Air temperature(°C) |
| Natural convection cooling | 28 |
| Compressed air cooling | 26 |
| Vortex tube ; 20 m/s | 4.8 |
| (Exair 3215) 60 m/s | -6.5 |

실험조건으로는 가열조건과 냉각조건을 분리하였으며 가열조건은 Table 1에 나타낸바와 같이 고주파 유도 가열기에서 전류는 100, 200, 300, 400A로 조절하였으며, 주파수는 30 kHz, 가열시간은 4 sec로 고정시켰다. 고주파유도코일 내로 흐르는 냉각수의 온도는 18℃로 일정하게 유지하였으며 대기온도는 29℃이고 금형코어 표면의 초기온도는 29℃이다. Table 2는 냉각조건을 나타낸 것이다. 금형코어 표면 냉각시에 분사되는 유속이 20, 40, 60 m/s가 되도록 조절하여 냉각실험을 수행하였으며, 금형코어 표면에 분사되는 튜브의 직경은 8 mm이다.

2.3 급속가열 과정의 유한요소해석⁽¹¹⁾

본 연구에서는 고주파 유도가열 과정의 해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 전자기장 해석과 열전달 해석을 연계하여 수행하였다. Fig. 5에 도시된 해석영역을 2차

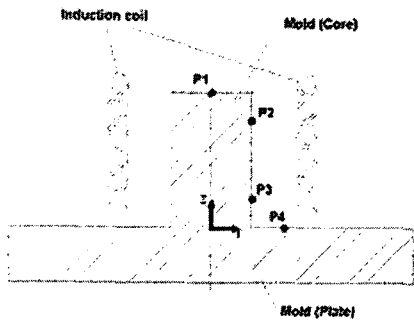


Fig. 5 Schematic description of the heating section



Fig. 6 Temperature distribution after heating (4 sec)

원 축대칭 문제로 단순화시켜 유한요소 해석모델을 구성하였다. 경계 조건으로는 코일에 400 A, 30 kHz의 고주파 전류를 인가하였다.

Fig. 6에 4초 후의 금형의 온도분포를 도시하였다. 온도분포를 살펴보면 금형 측면부 표면에서 최대 166.7℃까지 상승되는 것으로 나타나 일반적인 고분자 수지의 유리전이온도 이상으로 가열됨을 확인할 수 있었다. 반면에 코어의 중심부 온도는 40~90℃로 나타나 금형의 표면부에 온도상승이 집중됨을 알 수 있다. 해석의 신뢰성을 검증하기 위해 금형코어 중앙부(Fig. 5참조)에서의 시간대별 온도변화를 실험결과와 비교하였다.

Fig. 7은 각각의 경우에 대한 온도변화를 그래프로 도시한 것으로서 해석결과가 실험결과와 비교할 때 온도의 상승 경향은 물론 정량적으로도 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 냉각방법에 따른 온도특성

Fig. 8은 자연대류 냉각에서 시간에 따른 금형코어 온도를 측정한 그래프이다. 가열시의 온도변화는 전류가 클수록 온도상승이 크게 일어났으며, 특히 400 A, 4 sec 가열의 경우 금형코어 온도는 최대 265℃까지 가열되었고 자연대류 냉각으로 29℃까지 냉각시키는데 2,800 sec로 상대적으로 오랜 시간이 소요되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 냉각방법으로 60 m/s의 유속을 가지는

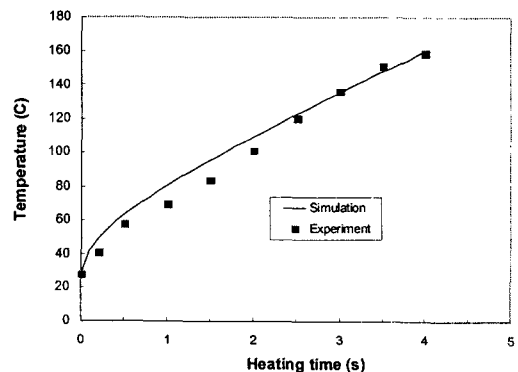


Fig. 7 Comparison of temperature variation during the heating stage

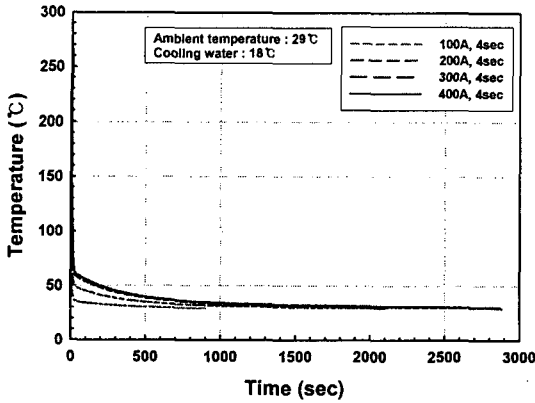


Fig. 8 Temperature variations for the natural convection cooling

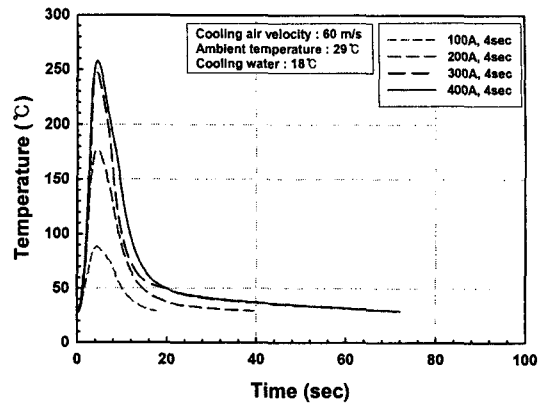


Fig. 10 Temperature variations for the vortex tube air cooling at 60m/s

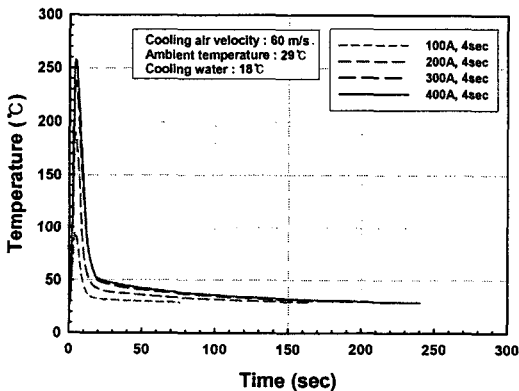


Fig. 9 Temperature variations for the compressed air cooling at 60m/s

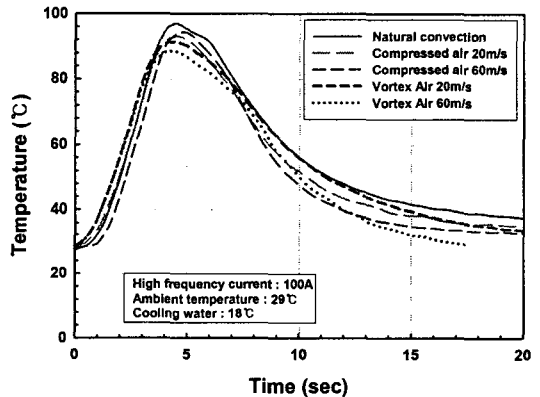


Fig. 11 Temperature variations for the high frequency current heating at 100A

7 kg/cm²의 압축공기를 사용했을 때 시간에 대한 금형코어 표면의 온도변화를 나타낸 그래프이다. 고주파 유도가열기를 사용하여 급속가열하는 경우 각 전류별로 온도상승경향은 Fig. 8과 비슷하였으며, 400 A로 가열한 금형코어를 29°C로 냉각시키는 데 걸리는 시간은 387 sec로서 Fig. 8의 자연대류 냉각시와 비교했을 때, 약 6.2배 크게 단축되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 냉각방법으로 60 m/s의 유속을 가지는 7 kg/cm²의 볼텍스튜브를 사용하였을 때, 온도변화를 측정된 그래프이다. 금형코어 표면의 온도변화는 Fig. 9와 Fig. 10의 경향에서처럼 전류가 높을수록 크게 나타났으며, 400 A에서 냉각에 소요되는 시간은 72 sec가 소요되었다. Fig. 8의 자

연대류냉각 실험과 비교했을 때, 약 37.8배의 냉각시간이, Fig. 9의 압축공기와 비교해서는 약 4.4 배 냉각시간이 단축되었다. 이것은 동일한 유속으로 금형코어 표면을 냉각했을 때 Table 2의 실험조건에서 볼 수 있듯이 볼텍스 튜브의 경우 냉각공기온도가 60 m/s의 경우 -6.5°C로서 자연대류 냉각 28°C, 압축공기냉각 26°C에 비해 낮기 때문에 금형코어 표면의 온도를 급속하게 낮출 수 있는 것으로 판단된다.

3.2 전류에 따른 온도특성

Fig. 11은 고주파 유도가열기를 사용하여 100 A로 급속가열하고 자연대류, 압축공기, 볼텍스 튜브로 냉각을 하였을 때 금형코어의 온도변화를

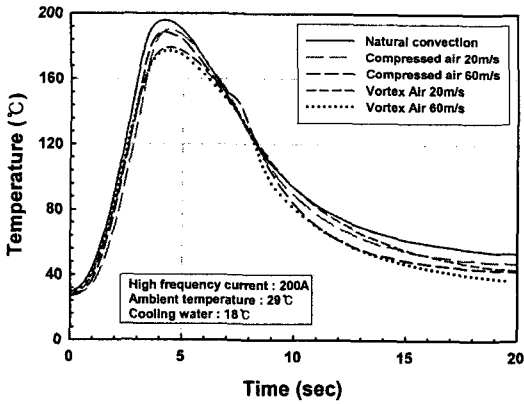


Fig. 12 Temperature variations for the high frequency current heating at 200A

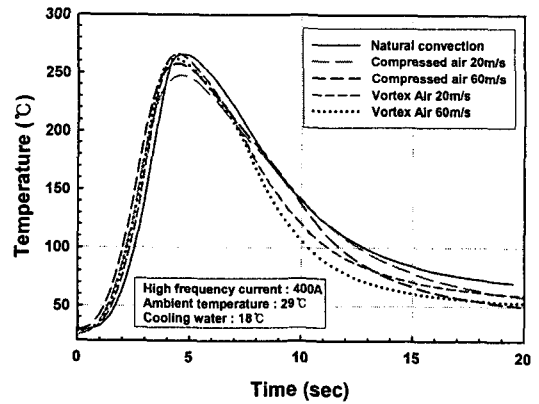


Fig. 14 Temperature variations for the high frequency current heating at 400A

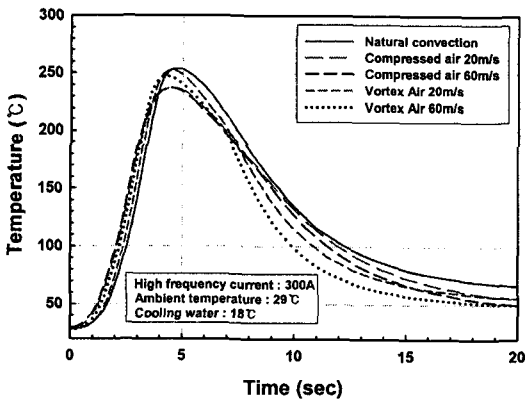


Fig. 13 Temperature variations for the high frequency current heating at 300A

나타낸 것이다. 100 A로 급속가열시에 최대 온도 점은 Fig. 8, 9 및 10의 경우처럼 95°C 전후에서 형성되어 실험의 반복성이 확인되었으며, 금형코어 온도가 냉각되는 시간은 볼텍스튜브, 압축공기, 자연대류 순으로, 유속에 따라서는 60, 20 m/s 순으로 예측가능한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 12는 고주파 유도가열기를 사용하여 200 A로 급속가열하고 자연대류, 압축공기, 볼텍스튜브로 냉각을 하였을 때 금형코어의 온도변화를 나타낸 것이다. 200 A로 급속가열시에 최대 온도 점은 190°C 전후에서 형성되었으며 급속가열시에 는 Fig. 11의 경향과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 13은 고주파 유도가열기를 사용하여 300 A로 급속가열하고 자연대류, 압축공기, 볼텍스

튜브로 냉각을 하였을 때 금형코어의 온도변화를 나타낸 것이다. 300 A로 급속가열시에 최대 온도 점은 250°C 전후에서 형성되었다.

Fig. 14는 고주파 유도가열기를 사용하여 400 A로 급속가열하고 자연대류, 압축공기, 볼텍스튜브로 냉각을 하였을 때 금형코어의 온도변화를 나타낸 것이다. 400 A로 급속가열시에 최대 온도 점은 270°C 전후에서 형성되었다. 400 A의 경우 100, 200, 300 A와 냉각시간을 비교해보면 금형코어 표면온도가 높게 올라가 있기 때문에 냉각하는데에는 더 많은 시간이 소요됨을 알 수 있다.

일반적으로 사출금형 업계에서는 금형의 표면 온도가 200°C가 넘어가게 될 시에는 금형산화 등의 문제점이 발생하므로 금형표면온도는 180°C 전후에서 설계가 되게 된다.

Fig. 11~14의 결과를 정리해볼 때 만일 사출 성형할 수지가 PC(Polycarbonate)라면 유리전이온도는 150°C이고 코일을 이동시켜 금형을 달을동안 자연대류로 냉각되는 손실을 감안한다면 목표가열온도는 180°C 정도가 된다. 본 논문에서의 실험결과에 의하면 180°C까지 가열하기 위한 최적의 조건으로는 200 A 전류로는 4 sec, 300 A에서는 3 sec, 400 A에선 2.5 sec 가열 했을 때 180°C에 도달 가능한 최적 시간임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 박육제품의 사출성형시 생산성

을 향상시키기 위해서 급속가열 및 급속냉각방식을 적용하여 컵형상의 금형코어 형태에 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고주파 유도가열 과정의 해석을 전자기장 해석과 열전달 해석을 연계하여 수행한 결과 해석과 실험결과가 온도의 상승 경향은 물론 정량적으로도 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

(2) 4 sec간의 급속가열시 금형코어 표면의 온도는 $400 > 300 > 200 > 100$ A 순으로 전류가 높을수록 크게 나타났으며, 특히 400 A의 경우를 급속냉각하는 경우에는 볼텍스 튜브로 냉각하는 경우 자연대류냉각에 비해 약 37.8배의 냉각시간이, 압축공기와 비교해서는 약 4.4배 냉각시간이 단축되어 금형냉각에 효과적임을 확인하였다.

(3) 금형코어 온도를 급속가열한 경우 몇회의 실험시에도 전류별로 일정한 온도대가 형성되어 실험의 반복성이 확인되었으며, 급속냉각시에는 볼텍스 튜브, 압축공기, 자연대류 순으로, 유속에 따라서는 60, 20 m/s 순으로 금형코어의 표면온도가 낮아짐을 알 수 있었다.

(4) 금형표면 목표온도를 180℃로 가열할 경우 최적의 조건으로는 200 A 전류로는 4 sec, 300 A에서는 3 sec, 400 A에선 2.5 sec로 가열할 때 180℃에 도달 가능한 최적 시간임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2010 생산기반 혁신기술 개발사업의 일환으로 수행중인 「기능성고분자소재 성형용 마이크로 금형시스템」의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Selden, R., 2000, "Thin Wall Molding of Engineering Plastics a Literature Survey," *J. Injection Molding Tech.*, Vol. 4, pp. 159~166.
- (2) Jim, F., 1995, "Thin Wall Molding Differences in Processing over Standard Injection Molding," *Proceedings of the SPE Annual Technology Conference*, Vol. 41, pp. 430~433.
- (3) Kim, B. H., Suh, N. P., 1986, "Low Thermal Inertia Molding," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 25, pp. 73~93.
- (4) Jansen, K. M. B., 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., Kim, B., 2002, "Development of Rapid Heating and Cooling Systems for Injection Molding Applications," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, pp. 2471~2481.
- (6) Yao, D. 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.
- (7) Park, K., 2004, "A Study on Flow Simulation and Deformation Analysis for Injection-Molded Plastic Parts Using Three-Dimensional Solid Elements," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 43, pp. 1569~1585.
- (8) Park, K., Kim, B. H., 2006, "A Study on Improvement of Flow Characteristics for Thin-Wall Injection Molding by Rapid Mold Heating," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 15, No. 1, pp. 15~20.
- (9) Chen, S. C., Peng, H. S., Chang, W. R. and Jong, W. R., 2004, "Simulations and Verifications of Induction Heating on a Mold Plate," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 971~980.
- (10) Chang, J. A. Chen, S. C. and Cin, J. C., 2006, "Rapid Mold Temperature Control on Micro-Injection Molded Parts with High Aspect Ratio Micro-Features," *Proceedings of the SPE Annual Technology Conference*, Vol. 52, pp. 1275~1279.
- (11) 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. of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 16, pp. 113~119.
- (12) Kwon, O. K., Yun, J. H., Cha, D. A., Jung, S. Y. and Park, K., 2006, "Development of Rapid Mold Heating System Using Induction Heating(2)," *Proceedings of the KSME 2006 Fall Annual Meeting*, pp. 1296~1301.