

급속 금형가열 시스템 개발을 위한 고주파 유도가열 과정의 유한요소해석

박 근[#]· 황재진¹· 권오경²· 윤재호²

Finite Element Analysis of Induction Heating Process for Development of Rapid Mold Heating System

K. Park, J. J. Hwang, O. K. Kwon, J. H. Yun

(Received October 26, 2006)

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 material by means of an electric current that is caused to flow through the material or its container by electromagnetic induction. It has various applications such as heat treatment, brazing, welding, melting, and mold heating. The present study covers a finite element analysis of the induction heating process which can rapidly raise mold temperature. To simulate the induction heating process, the electromagnetic field analysis and transient heat transfer analysis are required collectively. In this study, a coupled analysis connecting electromagnetic analysis with heat transfer simulation is carried out. The estimated temperature changes are compared with experimental measurements for various heating conditions.

Key Words : Injection Molding, Induction Heating, Eddy Current, Finite Element Analysis, Electromagnetic-Thermal Coupled Analysis

1. 서 론

사출성형은 복잡한 형상의 고분자 제품을 제작할 수 있는 생산기술로서 제품의 경량화와 생산성 향상을 위해 많이 사용되는 방법이며, 최근에 휴대용 전자기기, 디스플레이 장치나 정보 저장매체 등의 제작에 널리 사용되고 있다. 일반적인 사출성형 과정을 살펴보면 고온으로 분사된 고분자수지가 금형 벽면을 채우며 성형이 이루어지는데, 이 과정에서 고온의 수지와 상대적으로 온도가 낮은 금형 벽면간의 열전달이 발생하게 된다. 고온의 수지 내부에서 금형면으로 열전달이 발생

하면서 금형과 인접한 부분에서는 급속하게 온도가 저하되어 수지의 응고가 진행된다. 이때 응고된 층의 두께는 일반적으로 편측 0.25mm 정도로 알려져 있으며, 대부분의 경우 전체 두께에 비해 상대적으로 적은 부분으로 전체적인 유동에 큰 영향을 미치지는 않는다. 그러나 두께가 매우 얇은 제품의 경우 응고층의 상대적인 비율이 증가하게 되고, 결과적으로 수지 유동의 저하를 초래하며 심한 경우 미성형(Short shot)을 유발할 가능성이 높다. 따라서 초미세 사출성형의 경우 유동 특성을 개선하기 위해 일반적인 경우와는 차별화된 사출성형 조건의 설정이 필요하다[1~2].

1. 서울산업대학교 기계설계 자동화공학부 원

2. 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

교신저자: 서울산업대학교 기계설계 자동화공학부,

E-mail: kpark@snut.ac.kr

사출성형의 유동특성을 개선하기 위해 높은 사출압력 및 사출속도, 낮은 점성의 수지 사용, 강건한 구조의 금형 설계 등이 적용되고 있는데[1], 이러한 특화된 공정조건은 사출성형기, 수지, 금형구조 등에 많은 제한점을 내포하고 있다. 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. Yao 와 Kim은 이러한 문제점을 극복하기 위해 사출금형에 고주파 전류를 인가할 때 발생되는 근접효과(Proximity effect)를 이용하여 급속으로 금형을 가열하는 급속 반응 사출성형(Rapid Thermal Response molding; RTR molding) 공정을 개발하였으며, 박육 사출성형의 유동특성을 개선하기 위한 실험적인 연구를 수행하였다[5]. 그러나 상기 방법은 금형의 절연을 위한 구조상의 제약이 있어 복잡한 형상의 금형에 적용하기에는 다소 제한이 뒤따른다[6-7].

본 연구에서는 다양한 형상의 금형의 급속가열에 적합한 고주파 유도가열(Induction heating)에 대해 고찰하고자 한다. 고주파 유도가열은 피가열체의 표면만을 급속으로 가열할 수 있어 사출금형에의 적용 측면에서도 많은 장점이 있다[8~9]. 이러한 특성을 체계적으로 고찰하기 위해 유한요소해석을 사용하여 고주파 유도가열에 의한 금형 표면의 온도변화를 예측하기 위한 제반 연구를 수행하고, 실험 결과와의 비교를 통해 해석의 신뢰도를 검증하고자 한다.

2. 고주파 유도가열의 이론적 배경

2.1 고주파 유도가열의 원리

고주파 유도가열은 교변자계 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 있어 급속 가열이 가능하고 표면충만을 가열할 수 있다는 장점이 있다[10]. 이러한 장점으로 인해 초기에는 금속을 용해시키는 목적으로 사용되어 왔으며, 최근에는 주조, 열간단조, 열처리 등의 다양한 금속가공에 이용되고

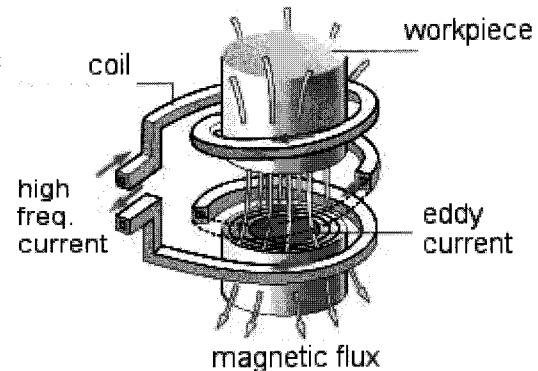


Fig. 1 Schematic description of induction heating

있다. Fig. 1에 고주파 유도가열의 기본 원리를 도시하였다.

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 침투깊이(Penetration depth, δ)는 아래와 같이 정의되며, 주파수가 높을수록 감소하는 경향을 보인다.

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

여기서 σ 는 도체의 비저항율(Resistivity), f 는 주파수, μ_0 와 μ 은 각각 진공의 투자율(Permeability) 및 피가열체의 상대투자율에 해당한다.

2.2 고주파 유도가열 과정의 수식화

고주파 유도가열을 해석하기 위해서는 일차적으로 유도전류에 의한 전자기장(Electromagnetic field)을 계산해주어야 한다. 전자기장 분포에 관한 지배방정식은 Maxwell 방정식을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

여기서 \mathbf{E} 는 전기장의 세기(Electric field intensity),

\mathbf{H} 는 자기장의 세기(Magnetic field intensity), \mathbf{D} 는 전속 밀도(Electric flux density), ρ 는 전하 밀도(Charge density), \mathbf{B} 는 자속 밀도(Magnetic flux density), \mathbf{J} 는 전류 밀도(Current density)이다. 전기장의 세기와 전속 밀도, 자기장의 세기와 자속 밀도와의 관계는 각각 유전율 ϵ 과 투자율 μ 를 사용하여 식 (6), (7)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (7)$$

고주파 영역에서 식 (3)의 변위전류항을 무시할 수 있으며, 이때 식 (8)의 음의 법칙을 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (9)와 같다.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (8)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \sigma \mathbf{E} = 0 \quad (9)$$

한편 자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 와 전기 스칼라 포텐셜 V 를 도입하면 자속밀도와 전기장의 세기는 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (10)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (11)$$

고주파 유도가열의 경우 교류 전원에 대한 해석이므로 전기 스칼라 포텐셜 V 의 영향을 무시할 수 있다. 이때 식 (10)과 (11)을 식 (9)에 대입하면 아래와 같이 자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 에 대한 수식으로 정리된다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

식 (12)에 대해 유한요소 수식화가 구성되며, 이를 사용하여 전자기장 해석을 수행할 수 있다. 이때 피가열체에 발생되는 단위체적당 저항열(Joule heat)은 아래와 같이 인가된 전기장의 세기로부터 계산된다.

$$q = \sigma \operatorname{Re}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) \quad (13)$$

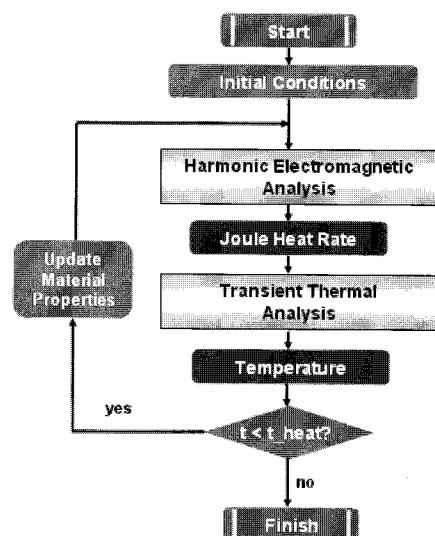


Fig. 2 Flow chart for the electromagnetic-thermal coupled finite element analysis

식 (13)으로부터 계산된 저항열 성분을 열원으로 하여 비정상상태 열전달 방정식을 계산해주면 고주파 유도에 의한 피가열체의 온도변화를 계산할 수 있다.

2.3 전자기-열 연계 유한요소해석

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS™를 사용하여 전자기장 해석과 열전달 해석을 연계하여 수행하였다. 특히 피가열체의 투자율, 비저항율, 열전도도 등의 주요 물성이 온도에 의존적인 점을 감안하여 반복계산에 의한 간접연계해석(Indirect coupled field analysis)을 사용하였다. 즉 전자기장 해석을 수행하여 피가열체 내부에 발생하는 저항열을 계산한 후 이를 이용하여 열전달 해석을 수행하고, 가열이 진행하는 동안 열전달 해석 결과로 얻어지는 피가열체의 온도분포에 따라 다음 단계에서 사용할 피가열체의 물성치를 갱신하고 다시 전자기장 해석과 열전달 해석을 반복적으로 수행하였다. Fig. 2에 이러한 일련의 과정을 순서대로 도시하였다.

3. 고주파 유도가열 시스템의 구성

본 연구에서는 해석의 타당성을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. Fig. 3에 고주파 유도가열 실험장치의 개략도를 도시하였다. 실험장치는 크게 고

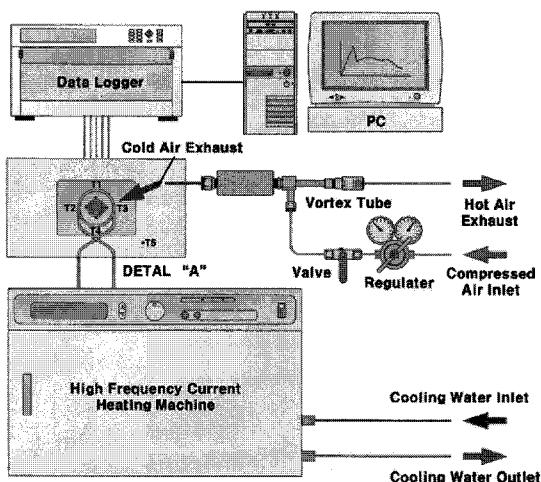


Fig. 3 Experimental setup for the induction heating equipment

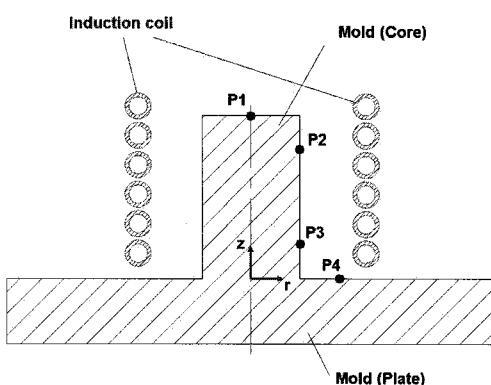


Fig. 4 Schematic description of the heating section

주파 가열기, 가열부, 냉각장치(압축공기, 블텍스 튜브) 및 테이터 처리장치로 구성된다. 실험에 사용된 고주파 가열기는 (주)피에스텍의 PSIH-15MF 모델을 사용하였으며 출력전력은 15 kW이다.

Fig. 4에 가열부의 개념도를 도시하였다. 피가열체는 직경 30mm, 높이 50mm의 원통형 금형이며, 이를 직경 70mm로 권선된 구리 코일이 둘러싸고 있다. 코일 단면의 외경은 8mm이며, 총 6회 권선되어 있다. 금형코어 표면의 온도 측정을 위해 Fig. 4에 도시된 4개의 위치에 K-type 열전대(Thermocouple)를 설치하였다. 실험은 동일 조건에 대해 총 3회씩 실시하여 평균값을 사용하였다.

4. 고주파 유도가열의 유한요소해석

4.1 고주파 유도과정의 전자기장 해석

고주파 유도가열 과정의 해석을 위해 Fig. 4에 도시된 해석영역을 2차원 축대칭 문제로 단순화시켜 유한요소 해석모델을 구성하였다. 경계 조건으로는 코일에 400A, 30kHz 의 고주파 전류를 인가하였고, 이에 따른 표피 효과를 고려하기 위해 식 (1)을 사용하여 침투 깊이를 계산한 뒤 해당 범위에 대해 4개의 유한요소 층(layer)을 갖도록 요소망을 생성하였다. 금형 재질은 탄소강(S45C)으로 설정하였는데, 일반적으로 탄소강의 전자기적 및 열적 주요물성(투자율, 비저항율, 열전도도 등)은 온도의 변화에 따라 변하게 된다. 사출금형의 고주파가열시 금형 표면의 온도가 고분자수지의 유리전이온도 이상으로 상승되는 것으로 예상되는데, 온도상승 따른 소재의 물성 변화를 효과적으로 고려하기 위해 비선형해석을 수행하였다. Fig. 5 (a)와 (b)에 각각 온도변화에 따른 재료의 상대투자율 및 비저항율의 변화를 도시하였다.

Fig. 6에 해석 결과로부터 얻어진 자속선(flux line)의 분포를 도시하였다. 코일에서 발생된 자기장이 상대적으로 투자율이 높은 금형을 투과하지 못하고 표면에 흡수됨을 알 수 있는데, 흡수된 교변자장은 결과적으로 표면부위에 와전류를 형성하여 표면의 온도 상승을 유발하게 된다. 보다 정량적인 고찰을 위해 Fig. 7에 금형 표면부에 발생된 주울열의 분포를 코어 바닥면에서의 높이(z)에 대해 그래프로 도시하였다. 그래프를 보면 바닥면에서의 높이가 증가할수록 주울열이 증가하다 자속선이 집중되는 32mm 지점(Fig. 6 참조)을 정점으로 감소함을 알 수 있다. 또한 금형 외벽($r=15.0\text{mm}$)에서 발생된 주울열이 표피층 내부($r=14.95\text{mm}$)에서의 주울열의 2배에 해당하는데, 결과적으로 고주파 전류에 의해 표면층만 집중적으로 가열됨을 확인할 수 있었다.

4.2 유도가열 과정의 열전달 해석

유도가열 과정의 열전달 해석을 위해 Fig. 2에 도시된 순서에 따라 반복해석을 수행하였다. 이때 열전달 해석을 위한 영역은 금형 부분으로만 한정하였다. 가열시간은 총 4초로 설정하여 과도해석(Transient analysis)을 수행하였다. Fig. 8에 열전달 해석을 통해 계산된 4초 후의 금형의 온도분포를 도시하였다. 온도분포를 살펴보면 금형 측면부 표

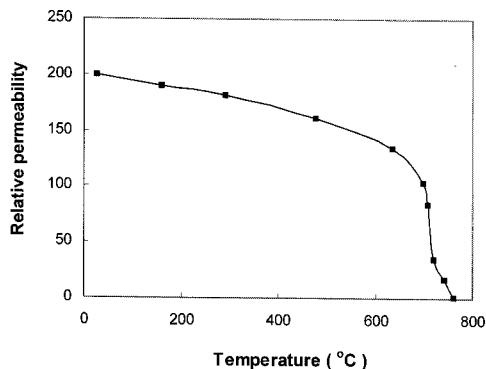


Fig. 5(a) Variation of the relative permeability with an increase of temperature

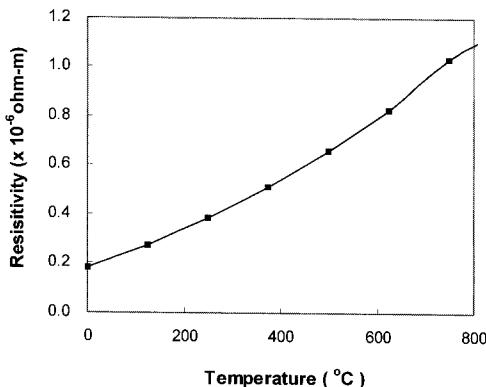


Fig. 5(b) Variation of the resistivity with an increase of temperature

면에서 최대 166.7°C까지 상승되는 것으로 나타나 일반적인 고분자 수지의 유리전이온도 이상으로 가열됨을 확인할 수 있었다. 반면에 코어의 중심부 온도는 40 ~ 90°C로 나타나 금형의 표면부에 온도 상승이 집중됨을 알 수 있다. 반면에 코일 하단에 위치한 평판의 표면부는 60°C이하로 나타나 상대적으로 온도상승이 저조함을 알 수 있는데, 이러한 온도분포는 금형 코어의 성형부 표면을 집중적으로 가열하고자 하는 의도에 부합함을 확인할 수 있었다.

해석의 신뢰성을 검증하기 위해 P2 지점(Fig. 4 참조)에서의 시간대별 온도변화를 실험결과와 비교하였다. Fig. 9에 각각의 경우에 대한 온도변화를 그래프로 도시하였는데, 해석결과를 실험결과와 비교할 때 온도의 상승 경향은 물론 정량적으로도 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

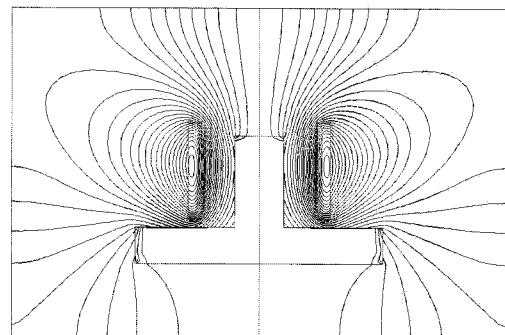


Fig. 6 Distribution of the magnetic flux line calculated from electromagnetic analysis

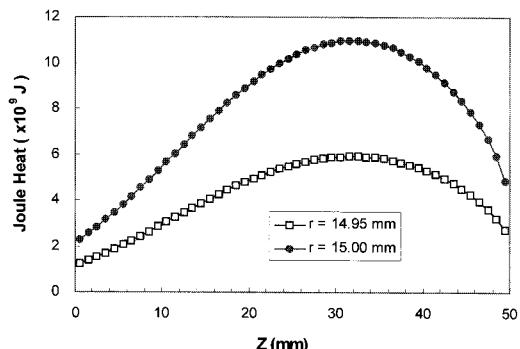


Fig. 7 Distributions of the induced Joule heat at various positions

Fig. 10에 4개의 측정지점(P1, P2, P3, P4)에서의 최대 온도에 대한 해석결과와 측정치를 비교하였다. P2 지점과 P4 지점에서는 잘 일치하는 반면, P1과 P3 지점에서 비교적 큰 오차를 보임을 알 수 있다. 이러한 오차의 주요 원인으로는 실험시에 코일의 중심을 정확하게 금형의 중심과 일치시킬 수 없었기 때문으로 분석된다. 즉 편심에 의해 코일과 금형과의 거리가 실제부분보다 가까워지는 부분이 발생하고, 해당 부분에서의 두드러진 온도상승이 열전도로 인해 금형의 전체적인 온도 상승을 유발할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

Fig. 11에 코일의 인가전류의 크기에 따른 P4 지점에서의 최대 온도에 대한 해석결과와 측정치를 비교하였다. 전반적으로 인가전류의 크기가 감소 할수록 유도전류도 감소되어 온도의 상승폭이 감소하는 경향은 유사하게 나타남을 확인할 수 있

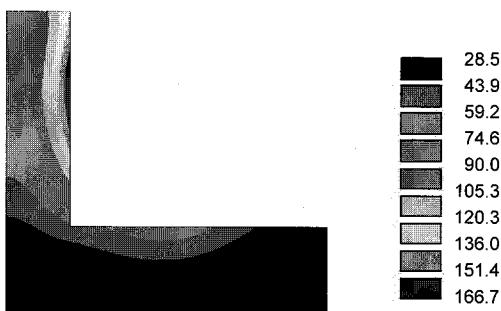


Fig. 8 Temperature distribution at the end of the heating stage (unit: °C)

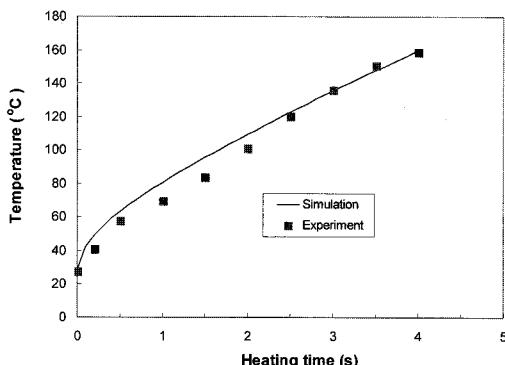


Fig. 9 Comparison of temperature variation at P2

었다. 다만 정량적인 측면에서 차이가 발생하는데, 전반적으로 해석 결과가 측정치보다 낮게 예측되며 이러한 경향은 인가전류가 감소할수록 더욱 두드러짐을 알 수 있다. 상기 오차의 원인은 본 연구에서 수행한 전자기-열전달 연계해석에서 히스테리시스 손실에 의한 발열효과는 무시하고 와전류에 의한 온도상승 효과만을 고려했기 때문으로 판단된다. 일반적으로 인가전류의 세기와 주파수가 높을수록 와전류에 의한 발열효과가 지배적으로 작용하는 점을 감안할 때, 인가전류가 감소될수록 히스테리시스 손실에 의한 발열효과의 비중이 상대적으로 커져 실험결과와의 차이가 증가하는 것으로 분석된다.

5. 결론

이상으로 본 연구에서는 고주파 유도가열의 기본 특성에 대해 고찰하였고, 보다 체계적인 분석을 위해 유한요소법을 사용하여 사출금형의 유도가열 과정을 해석하고 실험결과와 비교하였다. 이

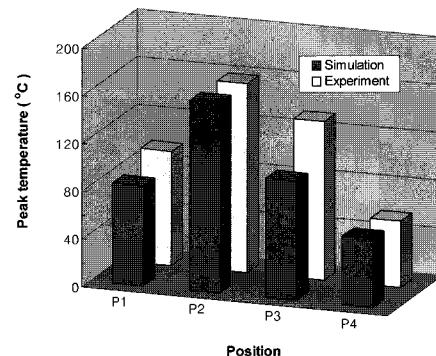


Fig.10 Comparison of the peak temperatures for various positions on the mold surface

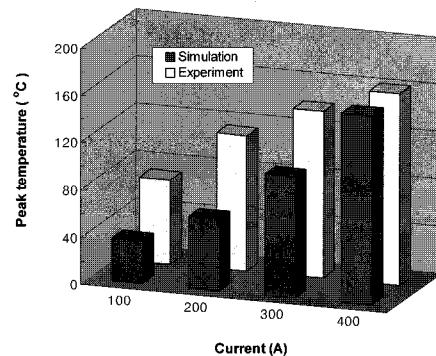


Fig.11 Comparison of the peak temperatures for various current conditions

러한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 고주파 유도가열의 이론적 배경에 대해 고찰하고, 피가열체의 물성이 온도에 의존적인 점을 감안하여 전자기-열 연계 유한요소법을 사용하여 사출금형의 유도가열 과정을 해석하였다.

(2) 해석결과로부터 계산된 금형의 온도분포를 고찰하여 표면부에 온도상승이 집중되는 현상을 확인할 수 있었으며, 결과적으로 생산성을 두드러지게 저하시키지 않으면서도 효과적으로 성형성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

(3) 해석결과의 신뢰성을 검증하기 위해 시간의 변화, 피가열체의 위치, 인가 전류의 세기 등 다양한 조건에 대한 온도변화를 실험결과와 비교하였다. 해석결과는 전반적으로 실험결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 분석되어 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

상기 연구결과로부터 향후 박육 사출성형, 초미세사출성형 등의 고부가가치 기술에 고주파 유도

가열의 적용이 가능할 것으로 전망되며, 특히 제안된 해석기법을 활용함으로써 개발과정의 체계화 및 효율화를 추구할 계획이다.

후기

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

참고문현

- [1] R. Seldén, 2000, Thin wall molding of engineering plastics-a literature survey, *J. Injection Molding Tech.*, Vol. 4, pp. 159~166.
- [2] F. Jim, 1995, Thin wall molding differences in processing over standard injection molding, *SPE ANTEC*, Vol. 41, pp. 430~433.
- [3] B. H. Kim, N. P. Suh, 1986, Low thermal inertia molding, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 25, pp. 73~93.
- [4] K. M. B. Jansen, A. A. M. Flaman, 1994, Construction of fast-response heating elements for injection molding applications, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 34, pp. 894~897.
- [5] D. Yao, B. Kim, 2002, Increasing flow length in thin wall injection molding using a rapidly heated mold, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 415, pp. 819~832.
- [6] K. Park, 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.
- [7] 박근, 김병훈, 2006, 급속 금형가열에 의한 박육 사출성형의 유동특성 개선에 관한 연구, *한국소성가공학회지*, 제 15 권 제 1 호, pp. 15~20.
- [8] S. C. Chen, H. S. Peng, J. A. Chang, and W. R. Jong, 2004, Simulations and verifications of induction heating on a mold plate, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 971~980.
- [9] J. A. Chang, S. C. Chen, and J. C. Cin, 2006, Rapid mold temperature control on micro-injection molded parts with high aspect ratio micro-features, *SPE ANTEC*, Vol. 52, pp. 1275~1279.
- [10] 이재건, 2002, 실무 고주파 가열, 진영사.