

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.5.575

열-유동 상호작용을 고려한 유도가열 적용 미세 사출성형의 통합적 수치해석

엄혜주* · 박근**†

* 서울산업대학교 에너지환경대학원 Nano-IT 공학과, ** 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

Integrated Numerical Analysis of Induction-Heating-Aided Injection Molding Under Interactive Temperature Boundary Conditions

Hye Ju Eom* and Keun Park**†

* Dept. of Nano-IT Engineering, Seoul Nat'l Univ. Tech.,

** School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul Nat'l Univ. Tech.

(Received November 30, 2009 ; Revised March 2, 2010 ; Accepted March 2, 2010)

Key Words : Induction Heating(유도가열), Injection Molding(사출성형), Finite Element Analysis(유한요소해석), Coupled Analysis(연계해석)

초록: 최근 박육사출성형이나 마이크로 사출성형에서의 성형성을 높이기 위해 급속 금형가열 기술이 사용되고 있다. 고주파 유도가열은 전자기 유도현상을 이용하여 금형 표면만을 효율적으로 가열할 수 있어 급속 금형가열 기술로서 활용되고 있다. 본 연구에서는 고주파 유도가열 적용 사출성형 과정의 수치적 모사를 위해 전자기장 해석, 열전달 해석, 사출성형 유동해석을 연계한 통합적 전산모사 기법에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 제안된 통합적 전산모사 기법을 유도가열 적용 박육 사출성형의 해석에 적용하여 실험결과와 비교하였고, 특히 금형온도 경계조건의 부여방식에 따른 해석의 신뢰성에 대한 고찰이 이루어졌다.

Abstract: In recent years, several rapid-mold-heating techniques that can be used for the injection molding of thin-walled parts or micro/nano structures have been developed. High-frequency induction heating, which involves heating by electromagnetic induction, is an efficient method for the rapid heating of mold surfaces. The present study proposes an integrated numerical model of the high-frequency induction heating process and the resulting injection molding process. To take into account the effects of thermal boundary conditions in induction heating, we carry out a fully integrated numerical analysis that combines electromagnetic field calculation, heat transfer analysis, and injection molding simulation. The proposed integrated simulation is extended to the injection molding of a thin-wall part, and the simulation results are compared with the experimental findings. The validity of the proposed simulation is discussed according to the ways of the boundary condition imposition.

1. 서론

사출성형은 복잡한 형상의 고분자 제품을 제작할 수 있는 생산기술로서 제품의 경량화와 생산성 향상을 위해 널리 사용되는 방법이다. 최근에 휴대용 전자기기나 디스플레이 장치, 정보 저장 매체의 보급이 확산됨에 따라 제품이 보다 작아지고 가벼워짐과 동시에 다양한 기능과 높은 정밀도를 요구하게 되었고, 이에 따라 미세 사출성형의 필

요성이 대두되고 있다. 일반적인 사출성형 과정을 살펴보면 고온으로 분사된 고분자수지가 금형벽면을 채우며 성형이 이루어지는데, 이 과정에서 고온의 수지와 상대적으로 온도가 낮은 금형 벽면간의 열전달이 발생하게 된다. 이로 인해 금형과 인접한 부분에서는 급속하게 온도가 저하되어 수지의 응고가 진행된다. 이때 응고된 층의 두께는 일반적으로 편측 0.25mm 정도로 알려져 있으며,⁽¹⁾ 대부분의 사출성형의 경우 전체 두께에 비해 상대적으로 적은 부분이므로 전체적인 유동에 큰 영향을 미치지 않는다고 생각된다. 그러나 두께가 매우 얇은 제

† Corresponding Author, kpark@snut.ac.kr

품의 경우 응고층의 상대적인 비율이 증가하게 되고, 결과적으로 수지 유동의 저하를 초래하며 심한 경우 미성형(short shot)을 유발할 가능성이 높다. 따라서 미세 사출성형의 경우 유동특성을 개선하기 위해 일반적인 경우와는 차별화된 사출성형 조건의 적절한 설정이 필요하다.⁽²⁾

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) 이러한 방법은 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.^(5,6) 최근에는 금형 형상에 제한 없이 가열이 가능한 고주파 유도가열을 적용하여 사출금형의 표면만을 급속으로 가열하기 위한 연구가 진행되어 왔다.⁽⁷⁻⁹⁾

한편 사출성형의 최적 조건을 효율적으로 찾기 위해 수치해석에 의한 전산모사 기법이 적용되고 있는데, 일반적으로 금형 온도 혹은 냉각수 온도를 경계조건으로 부과하여 해석을 수행하고 있다. 전자기적-열적 특성이 복합적으로 작용하는 고주파 유도가열의 경우 가열에 의한 금형의 온도변화를 적용해주어야 하며, 이를 위해 유도가열 해석 결과를 사출성형 해석의 온도 경계조건으로 설정한 연계해석기법에 대한 연구가 수행되었다.⁽¹⁰⁾

그러나 공정변수에 민감한 미세 사출성형의 경우 이러한 초기온도 경계조건만으로는 유동특성을 정확히 분석하기 어려우며, 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 금형과 수지 사이의 상호 열전달에 의한 온도변화를 고려한 해석이 필요하다. 즉, 사출성형이 진행됨에 따라 금형 벽면과 수지 사이의 열전달이 발생하게 되고 이에 따라 유동특성이 달라지며, 결과적으로 달라진 유동에 따라 수지와 금형간의 열전달이 변하는 것을 고려해야 한다. 그러나 이는 사출성형 전용해석 프로그램에서는 한계가 있어 본 연구에서는 범용 유동해석 프로그램을 이용하여 열전달, 유동 해석의 상호작용을 고려한 해석을 수행하고자 한다.

2. 고주파 유도가열을 적용한 사출성형의 통합적 연계 해석

2.1 고주파 유도가열의 지배방정식⁽⁸⁾

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

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

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 와 투자율 μ 를 사용하여 식 (5), (6)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

고주파 영역에서 식 (2)의 변위전류항을 무시할 수 있으며, 이때 식 (7)의 옴의 법칙을 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \sigma \mathbf{E} = 0 \quad (8)$$

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

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (10)$$

고주파 유도가열의 경우 교류 전원에 대한 해석이므로 전기 스칼라 포텐셜 V 의 영향을 무시하고 식 (9)와 (10)을 식 (8)에 대입하면 아래와 같이 자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 에 대한 수식으로 정리된다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

식 (11)에 대해 유한요소 수식화가 구성되며, 이를 사용하여 전자기장 해석을 수행할 수 있으며, 이로부터 피가열체에 유도된 와전류 값을 계산하고, 그에 따른 주울열(Joule heat)을 계산할 수 있다.

$$\dot{Q} = \sigma \|\mathbf{J}\|^2 \quad (12)$$

$$\nabla^2 [k(T)T] + \dot{Q} = \rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

$$-\frac{\partial}{\partial n} [k(T)T] = h(T)(T - T_\infty) \quad (14)$$

2.2 사출성형의 지배방정식

사출성형시 용융된 고분자의 유동을 수학적으로 묘사하기 위한 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho u_i)_{,i} = 0 \quad (15)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = -p_{,i} + \tau_{ji,j} + \rho f_i \quad (16)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i T_{,i} \right) = T_{,ii} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (17)$$

이때 점성계수(η)는 5개의 재료상수(n, τ^*, B, T_b, β)를 갖는 수정된 Cross 점성모델을 사용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (18)$$

여기서 n 은 지수, τ^* 는 전단 전이응력(transition stress), η_0 는 전단력이 작용하지 않을 경우의 점성계수(zero shear rate viscosity)로 다음과 같다.

$$\eta_0(T, p) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \exp(\beta p) \quad (19)$$

이때 T_b 는 온도 민감도(temperature sensitivity)이고, β 는 압력 계수(pressure coefficient)이다.

2.3 연계기법에 따른 통합해석

고주파 유도가열과 같은 급속 가열기법을 적용한 사출성형을 정확히 분석하기 위해서는 각 과정을 연계하여 모사해야 한다. 즉, 유도가열 과정의 전자기장-열전달 해석과 사출성형의 유동해석이 통합적으로 연계 해석되어야 비로소 급속 가열기법이 적용된 사출성형을 정확히 묘사할 수 있으며, 특히 작은 변수에도 민감한 미세 사출성형의 전산 모사에는 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 유도가열을 적용한 미세 사출성형을 전산모사하기 위해서 전자기/열/유동 통합적 연계 해석(Fully-integrated analysis)를 수행하였으며, Fig. 1에 통합적 연계해석의 순서도를 도시하였다. 첫 번째로 유도가열 과정을 전산모사하기 위해 전자기장-열전달 연계 해석을 수행하였다. 그 과정을 살펴보면 전자기장 해석을 수행하여 피가열체 내부의 저항열을 계산한 후 이를 입열원으로 하여 열전달 해석을 수행한다. 이때 피가열체인 금형의 물질 특성이 온도의존적인 점을 고려하기 위하여 유도가열 해석이 진행되는 동안 열전달 해석결과로 계산된 온도분포에 따라 물성치를 갱신하여 다음단계에 적용하고 반복적으로 해석하였다. 다음으로 유도가열이 종료되고 코일이 제거되어 금형이 닫히는 동안의 냉각에 관한 자연 대류 해석을 수행하였다. 마지막으로 사출성형 해석은 유도가열 해석결과인 금형 온도분포를 사출성형 해석시 금형의 온도 경계조건으로 설정하여 연계해석을 수행하였다.

이때 열-유동 상호작용을 고려한 해석의 필요성을 확인하기 위해서 유도가열 해석과 사출성형의 연계 기법에 따른 차이를 비교하였다. 동일 조건의 해석을 초기온도 경계조건(Initial temperature boundary condition), 열-유동 상호작용을 고려한 경계조건(Interactive temperature boundary condition)을 설정한 경우로 나누어 수행하였다. 첫 번째로 초기온도 경계조건은 유도가열 해석으로부터 얻은

금형 온도분포를 추출하여 사출성형 해석시 위치에 따른 초기 온도분포를 설정하고 해석한다. 이때 사출 해석의 금형 온도는 고정적으로 설정된다. 다음으로 열-유동 상호작용을 고려한 경계조건 역시 유도가열 해석으로부터 얻어진 금형 온도분포를 연계하여 사출 해석을 수행하지만, 금형 내부 및 금형과 수지 사이의 열-유동의 상호작용을 고려한 금형온도 경계조건을 설정하여 사출 해석을 수행한다.

전반적인 계산과정을 살펴보면 식 (17)의 에너지 방정식 계산과정에서 2.1 절에서 계산된 금형의 온도분포를 온도 경계조건으로 설정하여 고주파 유도가열 해석과 사출성형 해석을 효과적으로 연계하였다. 이때 초기온도 경계조건인 경우 열전달 방정식을 한번만 계산하여 식 (17)에 고정된 온도 경계조건을 설정하고 해석하였다. 반면 열-유동 상호작용을 고려한 경계조건인 경우 수지의 유동 과정 중 변하는 금형 내부 및 수지와 금형간의 열전달을 계산하기 위해 다음단계의 유동 해석시 식 (13)의 열전달식을 재계산하여 금형의 온도분포를 새롭게 적용하고 반복적으로 계산하여 열전달과 유동의 상호작용을 고려한 해석을 수행하였다.

3. 열-유동 상호작용을 고려한 고주파 유도가열 미세 사출성형의 통합해석

3.1 고주파 유도가열 과정의 유한요소해석

고주파 유도가열 과정의 해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS™를 사용하여 전자기장 해석과 열전달 해석을 연계하여 수행하였다. 고주파 유도가열 적용 대상 사출 성형품은 두께가 0.5mm 인 얇은 원형 컵 형상으로 Fig. 2 에 제품의 단면형상 및 주요 치수를 도시하였다. 제품을 성형하기 위한 금형은 탄소강(S45C)으로 구성되어있으며, 상온에서의 상대투자율은 200 이다. Fig. 3 에 가열 코일 및 금형 코어의 형상을 도시하였다. 금형 코어는 직경 30mm, 높이 50mm 의 원통형이며, 이를 단면 외경 8mm, 직경 70mm 인 구리 코일이 총 6 회 권선되어 둘러싸고 있다. 2 차원 축대칭 해석을 수행하여 문제를 단순화 하였으며, 표피효과를 고려하기 위해 침투 깊이에 해당하는 구간 (103.38 μm)을 10 층으로 나누어 조밀한 요소를 생성하였다. 유도가열 과정을 해석하기 위한 경계조건으로는 코일에 400A, 30KHz 의 고주파 전류를

인가하였다. 전자기장 해석결과 코일에서 발생한 자기장이 상대투자율이 높은 금형을 통과하지 못하고 표면에 흡수되고, 흡수된 교변자장은 결과적으로 표면부위에 와전류를 형성하여 표면의 온도 상승을 유발하게 된다. 상기 전자기장을 계산하고, 그에 따른 저항열을 계산하여 열전달 해석시 입력 조건으로 사용하였다. 열전달 해석은 가열시간 및 냉각시간을 각각 4 초로 설정하여 과도해석 (Transient analysis)으로 수행하였다.

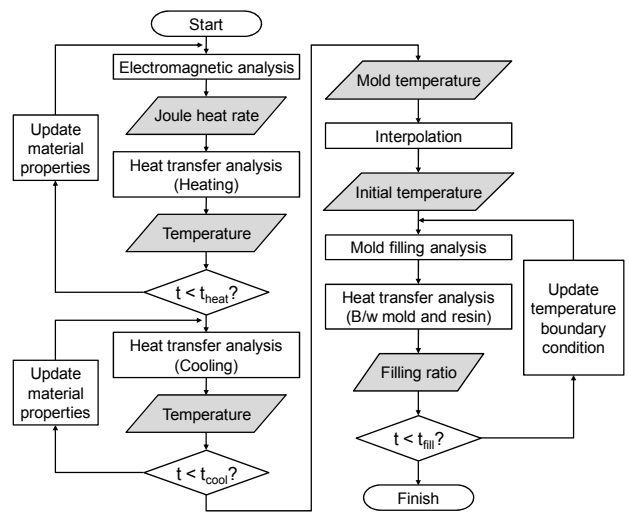


Fig. 1 Flow chart for the fully-integrated analysis of induction heating and injection molding

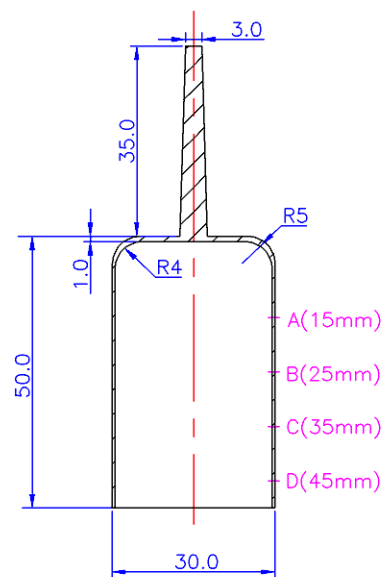


Fig. 2 Dimension of the thin-wall cup

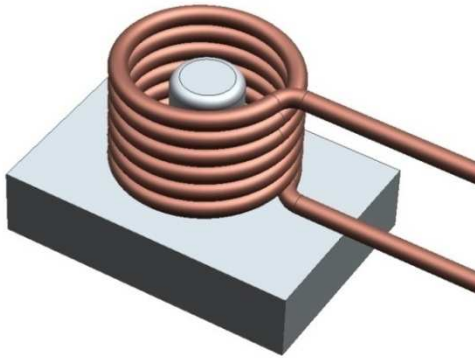


Fig. 3 Shape of an induction coil and a mold

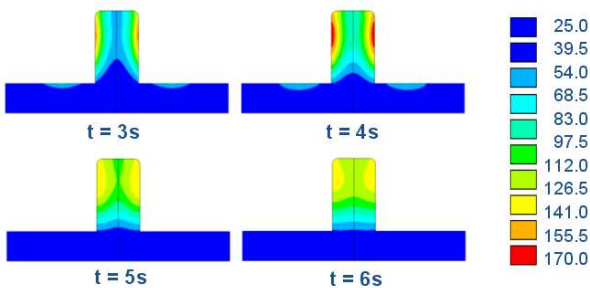


Fig. 4 Mold temperature distributions during the heating and cooling stages (unit: °C)

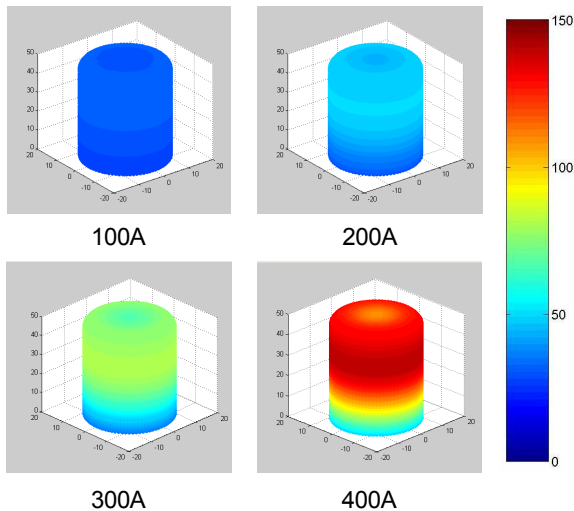


Fig. 5 Mold surface temperature under various current conditions (unit: °C)

Fig. 4 에 열전달 해석결과로부터 계산된 유도가열 및 냉각과정에서의 금형 단면내의 온도변화를 도시하였다. 가열시작 후 3 초경과시($t=3s$)부터 가열종료 후 2 초경과시($t=6s$)의 온도를 1 초 간격으로 나타내었다. 가열이 끝난 직후($t=4s$) 금형의 표

면부에서 최고온도를 나타내며, 이때 온도는 $166.85^{\circ}C$ 까지 상승되는 것으로 나타나 일반적인 고분자 수지의 유리전이온도 이상으로 가열됨을 확인할 수 있었다. 반면에 코어의 중심부 온도는 $40\sim 90^{\circ}C$ 로 나타나 금형의 표면부에 온도 상승이 집중됨을 알 수 있다. 또한 금형의 하단에 위치한 평판부는 $60^{\circ}C$ 이하로 나타나 상대적으로 온도상승이 저조함을 알 수 있는데, 이러한 온도분포는 금형 코어의 성형부 표면을 집중적으로 가열하고자 하는 의도에 부합함을 확인할 수 있다. 한편 가열이 끝난 후 냉각과정의 온도분포를 살펴보면 가열 후 1 초가 지난 시점($t=5s$)에서 온도가 $140^{\circ}C$ 이하로 나타나 금형의 온도가 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 금형의 표면만이 가열되었기 때문으로 분석된다.

3.2 유도가열 결과를 반영한 금형온도분포 예측

고주파 유도가열 적용시 인가되는 전류의 양에 따른 금형온도분포를 예측하기 위해 각각 100, 200, 300, 400A 의 전류를 인가한 경우에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 5 에 가열종료후 1 초 경과시($t=5s$) 인가전류에 따른 금형 표면의 온도분포를 도시하였다. 전반적으로 인가전류가 증가함에 따라 금형의 온도가 상승됨을 볼 수 있었다. 특히 200A 이하의 인가전류에서는 눈에 띄는 온도상승이 없었지만 300A 이상의 전류를 인가한 경우 금형온도가 급격히 상승함을 보여 인가전류의 증가에 따라 온도의 상승폭 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

또한 초기온도 경계조건과 열-유동 상호작용을 고려한 경계조건의 경우에 대한 금형온도 분포를 비교하기 위해 400A 의 전류를 인가하여 유도가열을 실시했을 경우 충전완료시 금형온도 분포를 Fig. 6 에 도시하였다. 이때 가로축의 높이는 유동 안내부를 제외한 컵의 바닥면을 기준으로 정의하였으며, 바닥면과 곡선부를 제외한 코어금형의 옆쪽 벽면(Fig. 2 참조)의 온도를 측정하였다. 그래프를 살펴보면 코일과 근접한 높이 10~30mm 구간에서 가열효과가 집중되고 이후 온도가 감소하는 경향이 2 가지 경우 모두 유사하게 나타났으나 구간별로 온도의 차이가 발생함을 확인할 수 있었다. 높이 10~30mm 구간의 경우 열-유동 상호작용을 고려한 경우의 온도가 초기온도 경계조건의 경우에 비해 상대적으로 낮게 예측되었으며(최대온도 차 $4.92^{\circ}C$), 이는 사출성형이 진행되는 과정에서 금형 내부로의 열전달 및 수지와와의 열전달 효과에

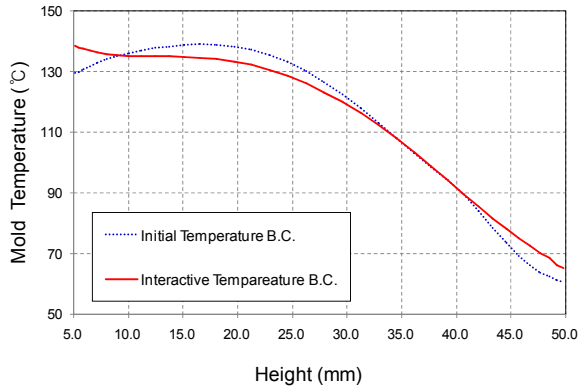


Fig. 6 Temperature profiles on the mold surface according to analysis methods (400A, unit: °C)

의한 것으로 분석된다. 반면에 높이 40~50mm 위치의 말단부 금형온도는 상호작용을 고려한 경우가 오히려 높게 나타났는데(최대온도차 6.52°C), 이는 유도가열에 의한 온도상승이 큰 금형 중심부에서 주변으로의 열전달에 의한 온도 상승 효과가 적절히 반영되었기 때문으로 분석된다. 미세 사출 성형의 경우 유동부의 두께가 매우 얇아 금형온도에 민감하기 때문에 위와 같은 온도 경계조건의 미세한 차이가 수지의 유동특성 변화 및 응고에 따른 미성형 예측에 민감하게 작용할 것으로 판단된다.

3.3 열-유동 상호작용을 고려한 유도가열 연계 사출성형 해석

고주파 유도가열을 적용한 사출성형을 보다 정확히 모사하기 위해 범용 유동 해석 프로그램인 Flow-3D®을 사용하여 유도가열 해석결과인 금형의 온도분포를 금형 초기온도로 입력하여 유도가열 해석결과를 사출성형 해석과 연계하였다. 또한 해석의 정확성을 향상시키기 위해 2.3 절에서 언급한 연계 기법 중 열-유동 상호작용을 고려하여 온도 경계조건으로 설정한 연계 해석을 수행하였다.

유도가열이 적용될 코어 금형과 그렇지 않은 바깥쪽 캐비티 금형의 각기 다른 초기온도 설정을 위해 각각을 분리하여 유동부의 해석영역 및 경계조건을 설정하였다. 캐비티 금형의 온도는 50°C로 설정하였으며, 코어 금형은 400A의 전류를 인가한 경우로 가열후 코일 제거 및 금형 형폐에 걸리는 시간을 감안하여 가열후 1 초 냉각시의 온도분포(최고 140.11°C, 최저 49.77°C)를 사용하였다. 수지는 제일모직 Starex® ABS SR-0320을 사용하였으며, 사출 온도는 230°C로 설정하였다.

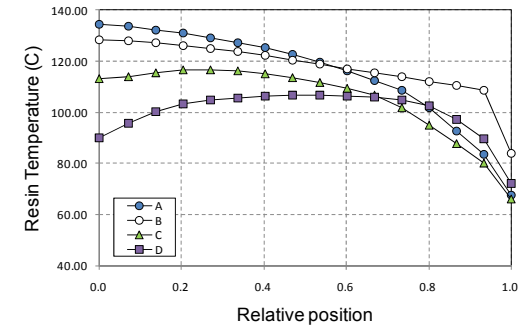
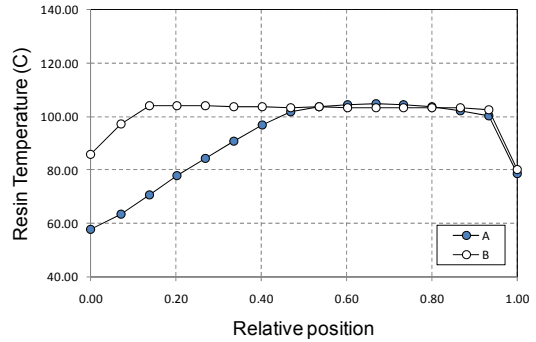


Fig. 7 Comparison of the resin temperature profiles :(a) without induction heating and (b) with induction heating (400A)

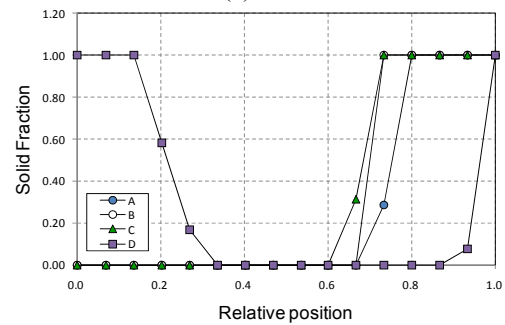
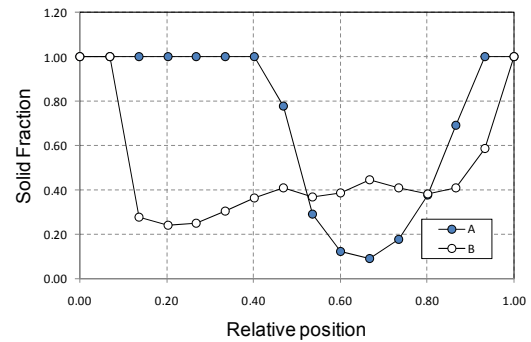


Fig. 8 Comparison of the solid fraction profiles :(a) without induction heating and (b) with induction heating (400A)

한편 유도가열의 효율성을 평가하기 위해 유도 가열을 적용하지 않은 경우(전체 금형온도 50°C)의 해석을 진행하였으며, Fig. 7 과 8 에 유도가열 적용여부에 따른 제품의 높이별 수지온도 및 고화도를 그래프로 비교하여 도시하였다. 이때 측정 위치는 컵의 바닥면을 기준으로 높이 15, 25, 35, 45mm 의 단면이며, 그래프에 최저 측정위치부터 차례대로 A, B, C, D 로 나타내었다(Fig. 2 참조). 또한 유동부내의 두께 방향 위치를 나타내기 위해 금형의 코어측 벽면을 0, 캐비티측 벽면을 1 로 설정하여 상대적으로 정의하였다.

해석결과를 전반적으로 살펴보면 비가열시(Fig. 7 (a) 참조) 미충전이 발생하여 A, B 위치의 정보만을 얻을 수 있었으나 유도가열을 적용함으로써 충전높이가 높아져 모든 위치의 정보를 얻을 수 있었다(Fig. 7 (b)참조). 이러한 해석결과를 통해 유도가열이 박육 사출성형에서의 성형성을 효과적으로 개선할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 한편 유도가열시 수지온도 분포를 살펴보면 수지와 금형간의 열전달에 의해 금형 벽면에 인접한 수지온도는 고화온도 이하로 떨어짐을 볼 수 있다. 이때 유도가열이 적용된 경우 캐비티측 수지온도는 66.0 ~ 83.9°C인 반면, 코어측 수지온도는 89.9 ~ 134.3°C로 나타나 유도가열의 영향을 받지 않은 캐비티 측의 수지온도가 더욱 급격히 하강됨을 확인할 수 있었다. 또한 유도가열을 적용하여 수지의 온도가 높게 유지되고 이에 따라 성형성이 향상됨을 알 수 있었다.

Fig. 8 에 각각의 경우에 대한 고화도 분포를 도시하였는데, 여기서 고화도란 액체상태를 0, 고체상태를 1 로 정의하여 유체의 상태변화 정도를 나타낸 수치이다. 고화도가 높아지면 점도가 증가하다가 일정 수치 이상이 되면 고체 상태의 결정을 이루며 유동을 방해하기 시작하고, 점점 고화가 진행되어 더 이상 흐르지 않는 상태가 된다. 그래프를 살펴보면 고주파가열 미적용시 유동부내의 응고층이 양측 금형 벽면에서 모두 두터운 반면, 유도가열 적용시 중심부 및 코어측 수지가 응고되지 않았음을 확인할 수 있는데, 이는 유도가열을 적용함으로써 응고층을 제거하고 유동성을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

3.4 유도가열 조건에 따른 유동특성 비교

본 연구에서는 고주파 유도가열을 적용한 사출성형 시스템을 구축하였으며, 실험장치는 고주파

Table 1 Injection molding conditions

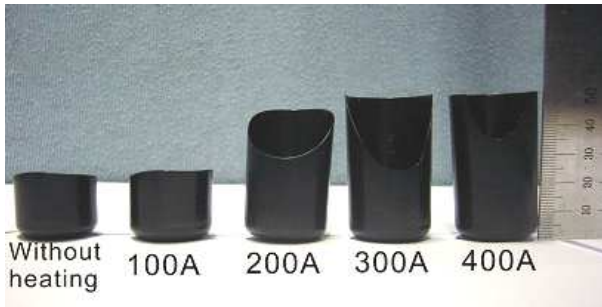
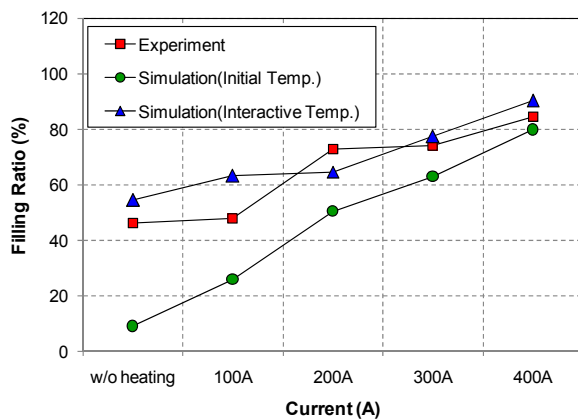
Molding conditions	Values
Resin material	ABS (SR-0320)
Hydraulic pump pressure (kg/cm ²)	100
Injection time (sec)	2.0
Packing time (sec)	1.5
Melt temperature (°C)	230

가열기, 가열코일, 컨트롤 박스 및 데이터 처리장치로 구성된다. 해석의 신뢰성을 확보하기 위해 해석과 동일한 조건에서 실험하였으며, 별도의 냉각회로를 구성하지 않고 자연대류 상태에서 냉각을 실시하였다. Table 1 에 사출성형 조건을 정리하였다. 또한 가열조건에 따른 성형성 개선효과를 고찰하기 위해 인가전류량을 100 ~ 400A 의 범위에서 100A 단위로 증가시켜 실험을 수행하였으며, 실험결과로 얻은 사출 성형품의 사진을 Fig. 9 에 도시하였다. 이때 코어금형과 캐비티금형의 편심으로 인해 성형품이 불균형하게 성형됐기 때문에 실험 샘플의 최고높이와 최저높이를 측정하고 평균값을 계산하여 실험결과값으로 사용하였다. Fig. 10 에 실험결과로부터 얻어낸 인가전류의 크기에 따른 충전율을 온도 경계조건에 따른 해석결과와 함께 비교하여 그래프로 도시하였다. 또한 정량적인 비교를 위해 연계기법에 따른 해석결과와 실험결과와의 오차를 Table 2 에 요약하였다.

먼저 실험결과를 살펴보면 인가전류가 증가함에 따라 46 ~ 84.5%까지 충전율이 증가함을 보여 고주파 유도가열의 효과를 확인할 수 있었다. 초기 온도 경계조건을 적용한 경우 전류가 증가함에 따라 유동특성이 향상되어 고주파 가열 미적용시 8.9%에서 최대전류(400A)인가지 79.7%로 증가함을 보여 유도가열 적용에 따른 성형성 개선효과를 나타내었다. 하지만 인가전류가 100, 200A 일 경우 각각 22.25, 22.50%의 오차가 발생하였는데, 이는 사출성형 해석시 금형 내부의 열전달이 고려되지 않은 관계로 충전과정에서 금형 온도가 초기온도로 고정된 상태로 해석되기 때문으로 보인다. 한편 인가전류의 증가될수록 오차가 감소함을 알 수 있는데(400A 의 경우 4.75%), 이는 상승된 금형의 온도가 초기온도로 고정된 상태에서 유동해석이 수행되기 때문으로 분석된다. 반면 열전달-유동 상호작용을 고려한 해석의 경우 오차가 최대 15.07%, 최소 3.19%로 감소되어 해석결과와 신뢰성이 향상됨을 확인할 수 있으며, 인가전류 증가

Table 2 Comparison of simulation error according to analysis methods (unit :%)

Applied current (A)	100	200	300	400
Initial temp. B.C.	22.25	22.50	11.00	4.75
Interactive temp. B.C.	15.07	8.44	3.19	5.72

**Fig. 9** Experiment results of flow patterns under various heating conditions**Fig. 10** Comparison of experiment and simulation results

에 따른 성형성이 향상되는 경향이 실험결과와 보다 유사함을 알 수 있다. 이는 금형 내부 및 금형과 수지 사이의 열전달을 고려하여 유동 해석을 수행하기 때문에 실제 유도가열이 적용된 사출성형 공정을 보다 정확히 모사한 것으로 판단된다.

4. 결론

이상으로 본 연구에서는 고주파 유도가열이 적용된 미세 사출성형을 수치적으로 모사하기 위해 열-유동 상호작용을 고려한 통합적 연계해석을 수행하였다. 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 고주파 유도가열 과정의 이론적 분석을 위해 전자기-열 연성 유한요소법 해석을 수행하였고, 해석 결과로부터 미성형이 예상되는 금형 코어 측

면부의 표면에 온도상승이 집중됨을 확인하였다.

(2) 유도가열 해석결과인 금형 온도분포를 사출성형해석시의 금형 초기온도로 설정하고, 보다 정확한 분석을 위해 열전달 해석과 유동 해석의 상호작용을 고려한 온도 경계조건을 설정하여 해석을 수행하였다.

(3) 고주파 유도가열 적용 여부에 따른 유동특성을 비교·분석하여, 실험결과 및 타 연계기법을 사용한 해석결과간의 비교를 통해 열-유동 상호작용을 고려한 온도경계조건을 적용한 해석이 기존의 결과에 비해 보다 정확함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Seldén, 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," *SPE ANTEC*, Vol. 41, pp. 430~433.
- (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) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Kwon, O. K., Jeong, H. T., Yun, J. H. and Park, K., 2007, "A Study of Rapid Mold Heating System Using High-Frequency Induction Heating," *Trans. J. Kor. Soc. Mech. Engng. (A)*, Vol. 31, pp. 594~600.
- (10) Eom, H. and Park, K., 2009, "Fully-Coupled Numerical Analysis of High-Frequency Induction Heating for Thin-Wall Injection Molding," *Polym. Plast. Tech. Eng.* Vol. 48, pp. 1070~1077.