

◆특집◆ 플라스틱 나노/마이크로 구조의 성형기술과 응용

플라스틱 미세구조 성형 해석기술 리뷰

박장민^{*,#}, 차경제^{**}

^{*}영남대학교 기계공학부, ^{**}한국생산기술연구원 극한제조기술그룹

A Review of Numerical Simulation Methods for Molding Processes of Plastic Microstructures

Jang Min Park^{*,#}, Kyoung Je Cha^{**}

^{*}School of Mechanical Engineering, Yeungnam University,

^{**}Ultimate Manufacturing Technology Group, Korea Institute of Industrial Technology

(Received 29 July 2015; received in revised form 5 August 2015; accepted 6 August 2015)

ABSTRACT

Molding technologies for plastic microstructures have been extensively investigated during the last two decades, and theoretical and numerical studies on the micro molding process have provided efficient tools for the development of such molding technologies. In this paper, we present a review of numerical simulation methods for the micro molding process. Basic models for a description of the material property, governing equations of the flow and heat transfer during the molding process, and numerical methods will be described. Particularly, numerical simulations for micro injection molding and hot embossing processes will be presented, and their main features noted and compared to those for conventional molding processes.

Key Words : Micro Injection Molding(미세사출성형), Hot Embossing(핫엠보싱), Microstructure(미세구조), Numerical Simulation(수치해석)

1. 서 론

1990년대 후반부터 초정밀 광학부품, 기능성 표면, 미세유체시스템(microfluidic system), 랩온어칩(lab-on-a-chip), 마이크로 로봇 등과 같이 마이크로 혹은 나노 스케일의 미세구조를 이용한 첨단 기술들이 개발되면서, 이들을 제작하기 위한 플라스틱

미세구조 성형 기술 연구가 많이 진행되었다^[1]. 플라스틱 성형 기술은 이미 그 역사가 반세기가 넘는 고전적인 기술이지만, 2000년대 들어서면서 미세구조 성형을 위해 첨단 가공 기술들과의 접목이 급격히 늘어났다^[1,2].

플라스틱 미세구조 성형을 위한 대표적인 공정으로는 미세사출성형(microinjection molding), 핫엠보싱(hot embossing), 열성형(thermoforming), 롤투롤성형(roll-to-roll) 등을 들 수 있다. 미세사출성형은 제품의 형상 설계에 자유도가 높고 생산성이 매우 높은 장점이 있다. 핫엠보싱은 미세유체시스템이나 랩온어칩 등과 같이 미세구조를 포함한 평판형 제품을

Corresponding Author : jpark@yu.ac.kr

Tel: +82-53-810-2456, Fax: +82-53-810-4627

성형하기 위해 개발되었으며 공정이 비교적 간단하고 재료의 변형이 크지 않다. 톨툴성형은 대면적의 플라스틱 필름 혹은 기관위에 미세구조를 연속적으로 생산할 수 있는 방법이다.

플라스틱 미세구조 성형은 기존의 마크로 스케일의 성형과 비교하여 다음과 같은 차이가 있다. 1) 금형에 의한 냉각의 영향이 매우 크게 나타나고, 2) 이러한 냉각의 영향을 최소화하기 위해 고속 혹은 고온 조건에서 성형을 하는 경우가 많으며, 3) 고속 성형의 경우 재료의 변형율이 매우 크게 나타나며, 4) 나노 스케일의 미세구조의 경우 표면 장력의 영향이 나타나기도 하고, 5) 이형 중 미세구조의 변형 혹은 파괴가 일어날 수 있다. 이와 같이 기존의 성형과 달리 미세성형에서 일어나는 현상을 이해하여야 성공적인 미세구조를 얻을 수 있으며, 이를 위해 다양한 수치해석 연구들이 진행되어 왔다. 본 논문에서는 이러한 수치해석 기법들을 정리하고 소개한다.

본 논문에서는 플라스틱 미세구조 성형 공정 중 대표적인 공정인 사출성형과 핫엠보싱의 해석기술들을 소개하고자 한다. 2장에서는 수치해석에 필요한 기본적인 이론들을 소개하고, 3장에서는 사출성형, 4장에서는 핫엠보싱의 수치해석 연구들을 소개한다. 5장에서 내용을 정리하고 향후 전망에 대하여 이야기한다.

2. 이 론

2.1 구성방정식

구성방정식은 재료의 변형율(ϵ) 혹은 변형속도($\dot{\gamma}$)와 응력(σ)과의 관계를 설명하는 식이며, 플라스틱 재료의 성형 공정 해석에서 많이 적용되는 구성방정식을 몇 가지 소개하고자 한다. 참고로 미세성형 해석에서 사용되는 구성방정식은 일반적인 성형 해석에 사용되는 구성방정식과 다르지 않다.

사출성형 중 충전 공정 해석의 경우 플라스틱 재료의 용융체를 비뉴튼 유체로 가정하고 응력 $\sigma = -p\delta + \tau$ 에서 아래와 같이 일반화된 뉴튼 점도 모델(generalized Newtonian viscosity)을 적용하는

경우가 많다^[3].

$$\tau = \eta(T, \dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (1)$$

위 모델은 사용이 편리하여 현재까지 성형 해석에 가장 많이 활용되어 왔으며, 사출성형과 같이 전단변형이 주가 되는 성형 공정에서는 정확도가 높다.

한편 점탄성 구성방정식을 적용하는 경우도 있으며, 이 경우 응력의 발달과 이완 현상을 더욱 엄밀하게 모사할 수 있으며, 제품 내 잔류응력 예측이나 수축, 복굴절 등을 예측하기 위해 적용된다^[4]. 점탄성 구성방정식은 크게 선형 모델과 비선형 모델이 있으며, 핫엠보싱과 같이 변형이 크지 않은 경우 선형 점탄성 모델이 사용될 수 있다. 적분 형태의 선형 점탄성 모델의 일반적인 형태는 다음과 같다^[5].

$$\sigma = \delta_{ij} \int_{-\infty}^t \lambda(t-t') \frac{\partial \epsilon_{kk}(t')}{\partial t'} dt' + 2 \int_{-\infty}^t \mu(t-t') \frac{\partial \epsilon_{ij}(t')}{\partial t'} dt' \quad (2)$$

변형율이 큰 경우 비선형 점탄성 모델을 적용하며, 응력 τ 을 점성에 의한 부분 τ_v 과 탄성에 의한 부분 τ_e 으로 나누어 나타낼 수 있다. 탄성에 의한 응력은 구조텐서 c 를 통해 다음과 같이 표현할 수 있다^[4].

$$\tau_e = \frac{\eta}{\theta} c \quad (3)$$

여기서 구조텐서의 발달방정식은 점탄성 모델에 따라 결정된다^[5].

한편, 온도에 따른 물성의 변화는 일반적으로 Arrhenius 모델 혹은 Williams-Landel-Ferry(WLF) 모델이 많이 적용되며, 앞서 설명한 식 (1)-(3)에 포함된 물성 값의 shifting factor 로 적용된다^[3,4].

2.2 지배방정식

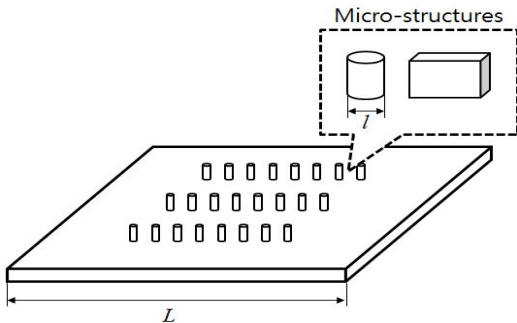


Fig. 1 A typical example micro-structures in micro injection molding

성형공정 해석을 위해 일반적으로 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 보존 방정식을 함께 연계하여 해석하여야 한다. 이들 식에 대하여는 여러 참고자료들에 잘 나타나 있으므로 [1-5], 본 논문에서 자세한 설명은 생략하고 중요한 몇 가지 특징만 소개하고자 한다.

현재까지 사출성형 공정 해석에서는 주로 두께가 얇은 제품에 대해 Hele-Shaw 가정을 적용하여 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 하나의 압력 방정식으로 통합하여 해석하는 방식이 많이 사용되었다[1]. 이 방법은 계산 양이 적고 정확도가 높아 현재 여러 해석 프로그램 개발의 기초가 되어 왔다. 하지만 두께 변화가 심한 제품이나 3차원 구조를 가진 제품 혹은 본 논문에서 다루는 미세구조와 같은 경우 Hele-Shaw 가정을 적용하는 것이 적합하지 않은 경우가 많다. 이런 경우에는 지배방정식을 3차원 그대로 해석하여야 하며, 계산 양이 매우 커지게 된다. 이러한 문제점에 대하여 다음 장에서 좀 더 자세히 다루고자 한다.

한편 일반적인 플라스틱 제품의 성형 공정에서 모세관 수(Capillary number)는 매우 크므로 표면장력의 영향을 무시할 수 있다. 하지만 미세구조의 크기가 마이크로에서 나노 스케일까지 작아질 경우 표면장력의 영향을 운동량 보존 방정식에 포함할 필요가 있다. 특히나 변형속도가 낮은 핫엠보싱 공정의 경우 모세관 수는 더욱 작아지며 따라서 표면장력의 영향을 반드시 포함해야 한다.

3. 사출성형 해석기술

미세 사출성형 해석에서 가장 어려움이 되는 부분은 Fig. 1과 같이 미세구조의 크기(l)와 전체 구조의 크기(L)의 비율(l/L)이 약 10^2 에서 10^4 로 매우 크기 때문에 발생한다. 이러한 구조물에 격자를 생성할 때, 미세구조 크기 l 을 기준으로 격자를 생성할 경우 너무 많은 격자를 사용하여야 하며, 전체 구조의 크기 L 을 기준으로 격자를 생성할 경우 미세구조 내에서 해석이 정확하지 못하게 된다. 이 장에서는 이와 같은 미세 사출성형 해석의 어려움에 대하여 소개하고, 이러한 어려움을 극복하기 위한 대표적인 연구들을 정리한다.

기존 연구들을 정리하면 다음과 같은 세 가지 해석 기법으로 구별 할 수 있다.

- i) 고전적 해석.
- ii) 완전 3차원 해석.
- iii) 도메인 연계형 해석.

위 세 가지 중 i)과 ii)은 기존 해석 방법들과 크게 다르지 않으며, iii)는 해석 기법 개발을 위한 연구가 많이 진행된 바 있다.

3.1 고전적 해석

이 방법은 기존의 Hele-Shaw 가정을 도입한 고전적인 해석방법을 그대로 미세 사출성형에 적용한 방법이다. 따라서 새로운 해석 기법의 개발은 없으며, 해석 결과의 정확성과 그 한계에 대하여 보고한 논문을 중심으로 설명하고자 한다.

Yu et al. (2002)은 기존의 Hele-Shaw 가정을 도입한 사출성형 해석 방법을 그대로 미세 사출성형 해석에 적용하였다[6]. 이와 유사하게 Su et al. (2004)는 Hele-Shaw 가정을 이용하여 미세 구조를 1차원 요소로 격자화 하여 해석을 수행한 바 있다[7]. 이러한 해석 결과를 실험 결과와 비교하였을 때, 공정 조건에 따른 미세 구조 성형성의 변화 양상은 비슷하게 예측 되었으나, 정량적으로는 차이가 있었다. 이는 Hele-Shaw 가정을 도입한 해석에서 3차원 유동 및 열전달 현상을 모사할 수 없기 때문인 것으로 설명 되었다. 또한 격자 생성에서 미세 구조에 대한 세밀한 격자를 구성하는데 한계가 있는

점 또한 본 해석 기법의 단점이다.

3.2 완전 3차원 해석

이 방법은 전 계산 영역에 대하여 완전 3차원 해석을 하는 방법으로, 3차원 유동 및 열전달을 엄밀하게 모사할 수 있어 이상적으로는 장점이 많으나, 현실적으로는 계산 양의 문제로 사용에 무리가 있어 왔다. 최근 CPU 및 메모리 성능의 향상으로 3차원 해석을 수행하는 사례가 종종 보고되고 있다.

Lin 과 Young (2009)은 완전 3차원 해석을 통해 미세 구조 성형성을 실험과 비교하였다⁸⁾. 여러 공정 변수에 따른 성형성을 실험 결과와 비교하였으며, 그 중 금형 온도에 따른 성형성에 대하여 해석 결과가 실험 결과를 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 그 원인으로는 사용된 점도 모델에서 온도의 영향을 엄밀하게 모사하지 못하기 때문으로 설명하였다.

Yang et al. (2010) 역시 완전 3차원 해석을 미세 사출성형에 적용한 바 있다⁹⁾. 하지만 앞서 설명한 바와 같이 격자 생성의 한계로 실제 구조와 같은 모델을 해석하지 못하였고, 미세 구조의 형태를 해석에 용이하도록 변경하여 해석을 진행하였다. 해석 결과는 실험 결과와 비교하여 공정 변수에 따른 미세 구조의 성형성에 대한 경향성은 비슷하게 나타났으나, 실제 금형 온도에 대한 정보가 부족한 점과, 해석에 사용된 형상이 실제 형상과 다르다는 점에서 해석의 한계를 나타냈다.

이와 같이 완전 3차원 해석은 여러 장점에도 불구하고 현재까지 Fig. 1과 같은 형상에 대한 적용에는 한계가 있는 상황이다. 하지만 최근 CPU 및 메모리의 성능 향상 추세를 볼 때 앞으로 완전 3차원 해석이 활발해 질 것으로 추측된다.

3.3 도메인 분리 해석

앞의 두 수치 해석 방법에서 드러난 가장 큰 문제는, Hele-Shaw 가정을 도입한 해석은 3차원 유동 및 열전달 현상을 고려하지 못하는 점과, 완전 3차원 해석은 계산의 양이 현실적으로 다루기에 너무 크다는 점이다. 또한 앞서 설명하였듯이 큰 $1/L$ 값 때문에 의해 격자 생성에 한계가 있다는 점이다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 도메인 분리 해석을 소개하고자 한다.

도메인 분리 해석은 전체 형상 중 미세구조를 분리하여 따로 해석하는 방법이다. 예를 들어 Fig. 1의 형상에 대하여 Fig. 2와 같이 바닥판에 대하여 Hele-Shaw 가정을 도입하여 해석하고, 그 해석 결과를 토대로 미세구조에 대하여 따로 해석을 수행하는 방법이다. 이 때 미세구조는 그 형상에 따라 3차원 해석을 하거나 Hele-Shaw 가정을 도입한 해석을 수행 할 수 있다.

이러한 도메인 분리 해석의 장점은 격자 구성이 비교적 자유롭다는 점, 미세구조의 3차원 해석에서 계산 양이 크지 않다는 점, 따라서 미세구조 성형에 대한 엄밀한 해석이 가능하다는 점이다. 다만 미세구조에 대한 해석을 수행 할 때 경계조건으로 바닥판의 해석 결과를 연계해야 하며, 이러한 과정에서 몇 가지 가정들을 도입하여야만 한다.

대표적으로 Yu et al. (2004)은 Fig. 2에 소개된 바와 같이 Hele-Shaw 가정을 통해 바닥판에 대한 성형 해석을 하고, 이 결과를 토대로 미세구조에 대하여 3차원 해석을 따로 수행하였다¹⁰⁾. 이와 유사하게 Lee et al. (2010)과 Choi and Kim (2011) 역시 도메인 분리를 통해 효과적인 성형 해석을 수행하였다^{11,12)}.

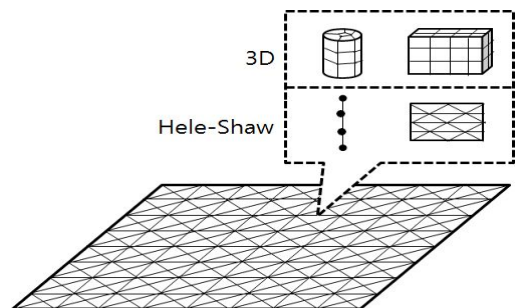


Fig. 2 Mesh system for domain decomposition method. Ground plate is discretized by triangular elements for Hele-Shaw flow analysis and micro-structures can be discretized by either 3D elements for full 3D analysis or by 1D and 2D elements for Hele-Shaw flow analysis.

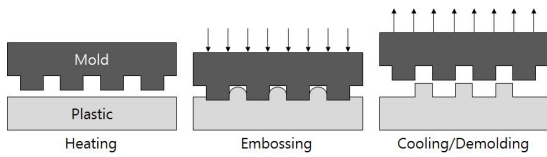


Fig. 3 Hot embossing process

4. 핫엠보싱 해석기술

핫엠보싱 공정은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 크게 세 단계로 이루어진다. 이 중 첫 번째 단계인 가열 단계는 특별한 해석을 요하지 않고, 두 번째 엠보싱 단계와 세 번째 냉각 및 이형(demolding) 단계가 주된 해석 대상이 되고 있다.

핫엠보싱은 사출성형에 비해 공정이 단순하며, 전문 해석 프로그램이 존재하지 않는다. 따라서 핫엠보싱 공정의 해석은 기존 구조해석 혹은 사출성형 해석 상용 프로그램들을 활용하거나, 특별한 경우 해석 프로그램을 직접 개발하는 경우도 있다. 본 논문에서는 상용 프로그램을 활용한 연구와 직접 프로그램을 개발한 경우에 대하여 각각 아래에 정리하였다.

4.1 상용 해석 프로그램 활용

핫엠보싱 공정 중 발생하는 플라스틱 재료의 변형과 열전달 현상은 비교적 간단하여 상용 해석 프로그램을 활용하는 방법이 많이 보고되었다.

Juang et al. (2002)은 구조해석 프로그램인 DEFORM을 활용하여 엠보싱 단계에서 충전 패턴, 응력분포, 변형률 분포 등을 해석하였다^[13]. 금형 벽면에서의 경계조건으로 slip 조건과 no-slip 조건을 비교하였으며, 실험결과와 비교하여 slip 조건이 더욱 적합한 것으로 나타났다.

Worgull과 Hecke (2004)는 사출성형 해석 전문 프로그램 Moldflow의 사출-압축 성형 모듈을 활용하여 엠보싱 공정을 해석하고, ANSYS의 구조해석 시스템을 활용하여 이형단계까지 해석하였다^[14]. 특히 이형 중 발생하는 미세구조 내 응력 분포와 파손에 대하여 몇 가지 실험 결과와 함께 소개하였다.

Song (2007)은 ANSYS를 활용하여 냉각-이형 중 발생하는 미세구조 내 응력 분포와 변형에 대하여 분석하였다^[15]. 플라스틱 재료의 구성 방정식으로 적분형태의 선형 점탄성 모델을 적용한 것이 특징이다. 이형 속도, 이형 각도 및 미세구조의 종횡비(aspect ratio)에 따라 응력 분포 특성을 분석하였다.

마지막으로 Liu et al. (2010)은 ANSYS의 구조해석 모듈을 활용하여 엠보싱 단계 중 플라스틱의 변형 거동 및 응력 분포를 해석하였다^[16]. 이 연구에서 엠보싱 단계 중 발생하는 변형을 크게 두 단계로 나누었으며, 각 단계에서 일어나는 변형 특성을 비교하였다.

4.2 해석 프로그램 개발

상용 해석 프로그램에서 다루지 못한 현상들을 해석하기 위해 몇 가지 해석 프로그램 개발 연구가 진행된 바 있다. 대표적인 몇 가지 결과를 소개하고자 한다.

Erickson and Rasmussen (2005)은 플라스틱 재료의 유변학적 특성에 따른 미세구조의 성형 특성을 연구하였다^[17]. 적분형 선형 점탄성 모델을 적용하였으며, 점탄성 거동 특성을 대표하는 데보라 수(Debra Number)에 따라서 미세구조를 충전하기 위한 거리를 비교하였다. 수치해석 기법으로는 사출성형에서 다루었던 도메인 분리 해석과 유사하게 멀티 스케일 해석 기법을 적용하였다.

Worgull et al. (2008)은 8-in 대면적 핫엠보싱을 위한 3차원 해석 프로그램을 개발하였다^[19]. 적분형 선형 점탄성 구성방정식을 적용하였으며, 금형과 플라스틱의 접촉면에서의 경계 조건으로 마찰력을 고려한 점이 특징이다. 이 연구에서 적용된 접촉면에서 작용하는 마찰력은 Worgull et al. (2008)에 의해 실험적으로 연구된 바 있다^[19].

Taylor et al. (2009)은 미세구조 충전에 대한 이론적인 모델을 개발하였고, 이를 통해 기존의 직접 수치해석보다 효율적인 해석을 가능하게 하였다^[20]. 해석의 정확도는 실험 결과와 비교하여 충전 높이의 오차가 7% 이내로 매우 정확한 것으로 나타났다.

Kang and Kwon (2007)은 엠보싱 단계에 대하여 3차원 수치해석을 수행하였다^[21]. 표면장력의 영향

을 포함하여 연구한 것이 특징이며, 냉각에 따른 미 층진에 대하여도 분석하였다.

Park et al. (2011)은 비선형 점탄성 모델을 도입하여 엠보싱 단계를 해석하였다^[22]. 단일 모드의 비선형 점탄성 모델을 적용하여 실제 재료의 물성과 다른 한계가 있으나, 엠보싱 속도에 따른 탄성 변형 특징에 대하여 설명하였다.

Kim et al. (2011)은 나노 구조에 대한 엠보싱 단계를 해석하였으며, 표면장력의 영향을 포함하였다^[23]. 나노 구조의 형상 변수와 공정 변수의 영향을 실험과 함께 비교하며 연구하였다.

5. 결 론

본 리뷰 논문에서는 미세구조의 사출성형과 핫 엠보싱 공정에 대한 대표적인 수치해석 연구들을 정리하였다.

일반적인 사출성형 해석의 경우 Moldflow 나 Moldex3D 등 상용 프로그램이 잘 개발되어 있다. 하지만 이를 미세구조의 해석에 직접 적용하기에는 한계가 있으며, 이러한 한계를 극복하기 위한 대표적인 방법으로 도메인 분리 해석 기법이 많이 연구되었다.

반면 핫엠보싱의 경우 전문 해석 프로그램이 존재하지는 않지만 ANSYS, Moldflow, DEFORM 등의 해석 프로그램을 활용하면 기초적인 해석이 가능하다. 다만 표면장력이나 점탄성 등의 영향을 엄밀히 해석하기에는 상용 프로그램의 한계가 있었다.

본 논문에 소개된 연구 외에도 다양한 연구가 있었으나, 기본적인 수치해석기법은 여기에 소개된 내용과 크게 다르지 않다. 앞으로 미세사출성형의 해석기술에 대한 전망으로는, 도메인 분리 해석 기법에 대한 사용자 편의성을 도입한 상용 프로그램으로의 전환이 필요한 것으로 보인다. 한편 핫엠보싱의 해석기술의 경우 금형의 거칠기 등과 같은 표면 특성을 고려한 해석, 최종 성형품의 특성 예측 등의 분야가 남은 과제라고 볼 수 있다.

현재 미세구조 성형의 수치해석 기술은 많이 발달된 것으로 보이며, 실제 제품 생산과 연계한 공정 조건 최적화 등에 활용될 정도의 기술 수준

에 이른 것으로 판단된다. 최근 국내외 산업계에 서 미세구조를 활용한 제품들이 많이 개발되는 추세임을 고려하면, 앞으로 미세성형 공정 해석 기술이 여러 분야에서 활용될 것으로 기대된다.

후 기

“이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1C1A1A02036960).”

REFERENCES

1. Hansen, H. N., Hocken, R. J. and Tosello, G., “Replication of micro and nano surface geometries,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, No.2, pp. 695-714, 2011.
2. Giboz, J, Copponnex, T. and Méle, P., “Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 17, No.6, pp. R96-R109, 2007.
3. Hieber, C. A. and Shen, S. F., “A finite-element/finite-difference simulation of the injection-molding filling process,” *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 7, No.1, pp. 1-32, 1980.
4. Lee, Y. B., Kwon, T. H. and Yoon, K. H., “Numerical prediction of residual stresses and birefringence in injection/compression molded center-gated disk. Part I: basic modeling and results for injection molding,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, No.11, pp. 2246-2272, 2002.
5. Christensen, R. M., *Theory of viscoelasticity: An introduction*, Academic Press, pp.36, 1982.
6. Yu, L., Koh, C. G., Lee, L. J. and Koelling K. W., “Experimental investigation and numerical simulation of injection molding with

- micro-features,” *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 42, pp. 871-888, 2002.
7. Su, Y. C., Shah, J., and Lin, L., “Implementation and analysis of polymeric microstructure replication by micro injection molding,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, No.3, pp. 415-422, 2004.
 8. Lin, H.-Y. and Young, W.-B., “Analysis of the filling capability to the microstructures in micro-injection molding,” *App. Math. Model.*, Vol. 33, No.9, pp. 3746-3755, 2009.
 9. Yang, C., Li, L., Huang, H., Castro, J. M., Yi, A. Y., “Replication characterization of microribs fabricated by combining ultraprecision machining and microinjection molding,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 50, No.10, pp. 2021-2030, 2010.
 10. Yu, L., Lee, L. J. and Koelling K. W., “Flow and heat transfer simulation of injection molding with microstructures,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 44, pp. 1866-1876, 2004.
 11. Lee, J. G., Lee, B.-K., Kang, T. G. and Kwon, T. H., “Experimental and numerical investigation of injection molding with microrib patterns,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 50, No.6, pp. 1186-1198, 2010.
 12. Choi, S.-J. and Kim, S. K., “Multi-scale filling simulation of micro-injection molding process,” *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol 25, No.1, pp. 117-124, 2011.
 13. Juang, Y.-J., Lee, L. J., and Koelling, K. W., “Hot embossing in microfabrication. Part II: rheological characterization and process analysis,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, No.3, pp. 551-566, 2002.
 14. Worgull, M., Hecke, M., “New aspects of simulation in hot embossing,” *Microsys. Technol.*, Vol. 10, No.5, pp. 432-437, 2004.
 15. Song, Z, Choi, J., You, B. H., Lee, J. and Park, S., “Simulation study on stress and deformation of polymeric patterns using the demolding process in thermal imprint lithography,” *J. Vac. Sci. Technol. B.*, Vol. 26, pp. 598-605, 2008.
 16. Liu, C., Li, J. M., Liu, J. S. and Wang, L. D., “Deformation behavior of solid polymer during hot embossing process,” *Microelec. Eng.*, Vol. 87, No. 2, pp. 200-207, 2010.
 17. Eriksson, T. and Rasmussen, H., K., “The effects of polymer melt rheology on the replication of surface microstructures in isothermal moulding,” *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 127, No.2-3, pp. 191-200, 2005.
 18. Worgull, M., Kabanemi, K. K., Marcotte, J.-P., Héту, J.-F., Hecke, M., “Modeling of large area hot embossing,” *Microsys. Technol.*, Vol. 14, pp. 1061-1066, 2008.
 19. Worgull, M., Kabanemi, K. K., Héту, J.-F., Hecke, M., “Hot embossing of microstructures: characterization of friction during demolding,” *Microsys. Technol.*, Vol. 14, No.6, pp. 767-773, 2008.
 20. Taylor, H, Lam, Y. C. and Boning, D., “A computationally simple method for simulating the micro-embossing of thermoplastic layers,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 19, No.7, 075007, 2009.
 21. Kang, T. G. and Kwon, T. H., “Numerical investigation of hot embossing filling characteristics,” *Int. Polym. Process.*, Vol. 22, No.3, pp. 266-275, 2007.
 22. Park, J. M., Kang, T. G., Park, S. J., “Numerical simulation of hot embossing filling stage using a viscoelastic constitutive model,” *Korea-Aust. Rheo. J.*, Vol. 23, No.3, pp. 139-146, 2011.
 23. Kim, S. M., Kang, J. H., Lee, W. I., “Analysis of polymer flow in embossing stage during thermal nanoimprint lithography,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 51, No.2, pp. 209-217, 2011.