Journal of the Microelectronics & Packaging Society
Vol. 8, No. 4, p. 67-72. 2001

반도체 칩 캡슐화성형 유동해석 및 성형조건 최적화에 관한 연구

허용정

한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

Flow Analysis and Process Conditions Optimization in a Cavity during Semiconductor Chip Encapsulation

Yong-Jeong Huh

School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

초 록: 반도체 칩 캡슐화성형시 칩 캐비티에서의 유동을 보다 엄밀하게 모델링하고 해석하기 위한 연구가 이루어졌다. 리드프레임에서의 구멍부위를 통과하는 유동의 모델링을 시도하였고 리드프레임에서의 열 경계조건을 정확하게 취급하였다. 유동의 이론적 해석을 위해 헬레쇼오 모델을 채택하였고 리드프레임에 의해 아래 위로 분리된 각각의 캐비티로 가정하여 해석하였다. 리드프레임에서 구멍부위를 통과하는 유동은 헬레쇼오 모델링시에 질량 소스(source) 항으로 삽입되었다. 유동해석 프로그램과 콤플렉스 방법에 기반을 둔 최적화 프로그램을 연계하여 미성형 방지를 위한 최적 공정조건을 성공적으로 정확하게 얻어낼 수 있었다.

Abstract: An Effort has been made to more accurately analyze the flow in the chip cavity, particularly to model the flow through the openings in the leadframe and correctly treat the thermal boundary condition at the leadframe. The theoretical analysis of the flow has been done by using the Hele-Shaw approximation in each cavity separated by a leadframe. The cross-flow through the openings in the leadframe has been incorporated into the Hele-Shaw formulation as a mass source term. The optimization program based on the complex method integrated with flow analysis program has been successfully used to obtain the optimal filling conditions to avoid short shot.

Key Words: Transfer molding, Flow analysis, Optimal filling conditions, Semiconductor chip, Chip encapsulation

1. 서 론

반도체 칩의 패키징(packaging)은 기계적이거나 화학적인 위험으로부터 칩을 안전하게 보호하고 열의 발산을 도와주는 역할을 하며 칩의 사용을 최적화하기 위해 요구되는 공정이다[1]. 패키징중에서 플라스틱 패키징은 약 80퍼센트의 점유율을 보이고 있으며 이는 점차로 증가하는 추세이다. 플라스틱 패키징의 경우 캡슐화(encapsulation) 공정이 요구되게 되는데 이 경우 복잡한 고분자 재료의 열기계적 거동을 모델링하고 해석해야하는 어려움이 존재한다. 그래서 반도체 성형해석 분야는 큰 발전을 보지 못하였으나, 최근 반도체 칩의 신뢰도에 대한 관심이 높아감에 따라 각광받게될 것으로 예상된다. Fig. 1에 대표적인 반도체 칩 종류의 하나인 이중라인 패키지(dual in-line package)를 도시하였다.

본 연구에서는 플라스틱 패키징 공정중 반도체 칩의 캡슐화 공정에 주안점을 두었다. 트랜스퍼 성형(transfer molding)은 반도체 칩을 캡슐화하기 위하여 가장 널리 사용되는 공정이다[2].

이와 관련된 연구로서 대표적인 연구로는 Turng과 Wang의 연구가 있으며 이들은 유동해석을 위하여 상당히 단순화된 모델을 사용하였다[3]. 즉, 에폭시 성형 합성물 용융액의 캡슐화 공정중의 거동을 일반화된 뉴턴유체 모델에 의해 기술하였다.

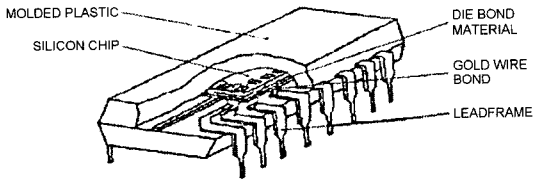

Fig. 1. Inside of dual in-line package.

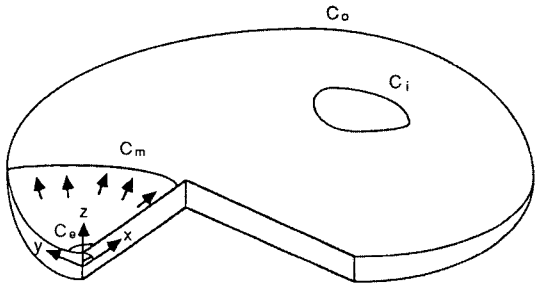

Fig. 2. Schematic diagram of flow in thin cavity.

본 논문에서는, 유동의 이론적 해석을 위하여 헬레쇼오(Hele-Shaw) 방정식을 채택하였고, 캐비티내 유동은 리드프레임에 의해 분리되는 것으로 가정하였다. 유동해석 모델이 얻어진 후, 반도체 칩 캡슐화 공정을 성공적으로 수행하기 위하여 가장 중요한 요건중의 하나는 최적의 공정조건을 구하는 것이며 이러한 작업은 전문가의 오랜 경험과 지식에 의해 수행되어 왔다. 그러나 경험에만 의존하는 방법은 대개 반복된 시작품의 제작을 통해 이루어지며 시간, 비용이 많이 요구되는 경우가 빈번하다. 그 이유중의 하나는 최적 충전조건 결정을 위해 요구되는 공정조건과 제품 품질간의 인과관계가 고도로 연성되어 있기 때문이다.

Pandelidis와 Zou[4]는 사출성형 공정에 있어서 최적 성형 조건을 구하기 위하여 사출성형 공정 시뮬레이션 프로그램과 최적화 기법의 연계를 시도하였다. 이들은 SUMT(sequential unconstrained minimization technique)을 CAE 프로그램과 접목하여 사출 시간, 플라스틱 용융액 온도및 금형 온도의 3가지 공정변수 최적화를 수행하였다. 목적함수는 최대 온도 분포의 차이, 과도 압입된 요소의 비, 마찰열에 의해 과도 가열된 요소의 비 등이 적절한 가중치 인자에 의해 조합되어 주어진다. 본 연구에서는 반도체 칩의 캡슐화를 위한 트랜스퍼 공정에 있어서 미성형을 방지하면서 충전 시간, 용융액 온도 및 금형 온도를 최적화하기 위한 시도가 이루어졌다. 트랜스퍼 성형 유동의 시뮬레이션을 위하여 코넬대학의 CIMP (cornell injection molding program)연구진에 의해 개발된 PACK3DM2[5]가 사용되었고, 최적화를 위한 방법론으로서는 컴플렉스(complex)기법[6]을 사용하였다.

2. 유동의 모델링 및 해석

2.1. 지배 방정식

에폭시 성형 합성물의 탄성은 샘플의 큐어링(curing) 정도가 낮을 경우 무시될 수 있다. 본 연구에서는 주로 캡슐화 공정의 충전단계에 주안점이 주어지므로 이 경우 샘플의 큐어링 정도가 낮기 때문에 유체의 탄성이 무시될 수 있고, 일반화된 뉴턴 유체로 가정될 수 있다 [7]. 일반적으로 칩 캐비티의 두께가 폭에 비해 훨씬 작으므로 일반화된 헬레쇼오 방정식의 적용이 가능하다[8]. 사용된 방정식은 Chiang 외의 연구와 Turng 및 Wang의 연구에 사용된 것과 유사하다[3,9].

연속방정식

고분자 재료 용융액의 압축성을 고려하기 위하여 연속방정식이 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

관성항을 무시하고 얇은 캐비티라고 가정하면 x와 y 방향의 운동량 방정식은 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial u}{\partial u}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta \frac{\partial u}{\partial u}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

z 방향의 운동량 방정식에 의해 z방향의 압력이 일정하다는 결론이 도출된다.

에너지 방정식

얇은 캐비티로 가정하고 전단과 큐어링에 의한 열량을 고려하면 에너지 방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

$$= \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \eta\dot{\gamma}^2 + \frac{d_\alpha}{dt}H \tag{4}$$

큐어링 방정식

이 방정식은 시간에 따른 큐어링의 진행정도를 고려하기 위한 것이다. 본 연구에서는 Kamal의 경험 방정식을

이용하였다[10].:

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}+u\frac{\partial \alpha}{\partial x}+v\frac{\partial \alpha}{\partial y}+w\frac{\partial \alpha}{\partial z}\right)=(K_{1+}K_{2\alpha^{\mu}})(1-\alpha)^{\nu} \quad (5a)$$

$$\alpha=\frac{H_t-H_e}{H_t} \quad (5b)$$

$$K_1=A_1\exp(-E_1/T) \quad (5c)$$

$$K_2=A_2\exp(-E_2/T) \quad (5d)$$

샘플의 큐어링 정도는 계측된 반응열을 이용하여 (5b) 식으로부터 계산될 수 있다. H_t는 이전에 아무런 반응도 일어나지 않은 경우에 있어서 샘플의 총반응열을 나타내고 H_e는 그 큐어링 정도가 결정된 실제 샘플의 반응열을 나타낸다. 위 식에서 α는 큐어링 정도를 나타내는 변수이고, μ, ν, A_1, A_2, E_1, E_2는 고분자 재료의 종류에 따라 결정되는 일정한 값의 매개변수를 나타낸다.

경계조건

캐비티 두께 방향에서의 경계 조건으로 다음과 같은 사항들이 고려된다. 벽에서의 미끄럼 방지 조건이 2차원 속도 경계 조건으로 사용된다.

두께 방향(z 방향)에서의 속도 성분은 리드프레임에서 구멍을 통과하는 유동 속도(W)로 가정된다. 금형 벽에서의 용융수지 온도는 금형벽 온도(Tw_1)로 가정되나 리드프레임에서의 용융수지 온도는 시간에 따라 변화 가능한 다른 온도(Tw_2)로 가정된다.

$z=0$ 에서 $u=0, v=0, w=0, T=T_{w1}$

$z=2h$ 에서 $u=0, v=0, w=0, T=T_{w2}(t)$.

리드프레임의 온도는 다음의 방정식으로 부터 얻어진다.

$$\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)_1-\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)_2=\left(\rho_L C_L h_L\frac{\partial T}{\partial t}\right)$$

Leadframe (6)

여기서 k는 유체의 열전도 계수이고 $\rho_L C_L h_L$ 은 각각 밀도, 비열, 리드프레임의 두께이다. 1,2는 리드프레임에 의해 분리된 각각의 캐비티 부분을 나타낸다. 유체에 비하여 리드프레임의 열전도 계수가 훨씬 크기 때문에, 리드프레임의 온도는 각 순간에 있어서 균일한 것으로 가정된다.

다음과 같이 파라미터를 정의한다.

$z=\lambda$ 에서 $\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{\partial v}{\partial z}=0$. (7)

평면 좌표에서 경계 조건은 다음과 같다.

입구 C_e에서

압력 : 균일하나 시간에 의존

온도 : 플런저 온도에서 일정

큐어링 정도 : 플런저 온도에서 진전

캐비티의 외부 경계 C_e와 존재가능한 인서트(insert)의 경계 C_i를 따라:

압력 : $v_n=\frac{\partial p}{\partial n}=0$

온도 또는 큐어링 정도 : 조건 없음

유동 선단 C_m 에서 압력은 0으로 가정된다. 유동 선단 영역에서 샘플의 다른 성질 (온도, 큐어링정도)은 특별한 주의를 요한다. 본 연구에서는, 현재의 시간 간격에서 z_2 에서의 성질이 이전 시간 간격에서 z_1 의 값에 의해 얻어진다고 가정한다. 여기서, z_1 과 z_2 는 다음 식으로부터 얻어진다.

$$\int_o^{z_1}\rho(u-\bar{u})dz+\int_{z_2}^{2h}\rho(u-\bar{u})dz=0 \quad (8)$$

여기서 $\bar{u}$ 는 두께 방향 평균 속도를 나타낸다.

2.2. 일반화된 헬레쇼오 공식화

x, y방향 질량 유량은 다음과 같이 주어진다[8-10].

$$\int_0^{2h}\rho u dz=-S\frac{\partial p}{\partial y} \quad (9)$$

$$\int_0^{2h}\rho v dz=-S\frac{\partial p}{\partial y} \quad (10)$$

여기서 S는 다음과 같다.

$$S=\int_0^{2h}\rho\int_0^z\frac{(\lambda-z)}{\eta}dzdz \quad (11)$$

연속 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^{2h}\rho dz-\frac{\partial}{\partial x}\left(S\frac{\partial p}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(S\frac{\partial p}{\partial x}\right)=-\rho W \quad (12)$$

ρ를 계산한 후에, 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$u=\frac{\partial p}{\partial x}\int_0^z\frac{(z-\lambda)}{\eta}dz \quad (13)$$

$$v=\frac{\partial p}{\partial y}\int_0^z\frac{(z-\lambda)}{\eta}dz \quad (14)$$

λ는 다음과 같이 결정된다.

$$\lambda=\int_0^{2h}\frac{z}{\eta}\mathrm{dz}/\int_0^{2h}\frac{1}{\eta}\mathrm{dz} \quad (15)$$

2. 성형성 평가

미성형은 반도체 칩 캡슐화 공정에 있어서 가장 중요시되는 결함중의 하나이다[2]. 미성형의 발생 원인으로서는 포획된 공기, 높은 유동저항과 유동 경로의 제한으로 인한 사출압력의 부족, 고분자 용융액의 조기 고화및 부적절한 기계의 선택등이 있다. 본 연구에서는 부적절한 기계를 선택한 경우는 고려하지 않기로 한다. Fig. 3에 전형적인 캡슐화 공정이 나타나 있다. 이것은 캡슐화 공정에 있어 미성형 실험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 본 연구의 목적중의 하나는 미성형을 판정하고 미성형 현상을 방지하기 위한 체계적 방법론을 얻으려는 것이다.

성형성 평가를 위한 규칙이 다음과 같이 주어질 수 있다[11].

IF : The machine capacity is [p*Q]
AND : The required for the cavity filling is higher than [p]
THEN : Short shot is possible.

여기서 Q는 유량을 의미한다. 미성형이 판정되는 즉시 최적화 프로그램이 구동되어 충전 시간, 용융액 온도, 금형 온도를 최적화하면서 미성형을 방지할 수 있는 최적 충전 조건을 구하게 된다. 이 과정에서 최적화 프로그램은 트랜스퍼 성형 공정 시뮬레이션 프로그램을 필요로하게 되며 이러한 목적으로 PACK3DM2 프로그램이 이용되었다. 이 프로그램은 트랜스퍼 성형 공정의 충전, 압입 과정및 큐어링(curing)과정을 해석할 수 있다.

3. 최적 충전 조건의 생성

3.1. 초기 충전 조건의 생성

최적화 프로그램과 PACK3DM2를 이용하여 임의의 초기 조건으로 최적해를 구할 경우 막대한 계산시간이 요구된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 비록 간단하지만 유용한 경험식을 이용하여 양호한 초기조건을 얻고자 하였다. 이러한 목적으로 White와 Dietz[12]의 연구결과가 이용되었다.

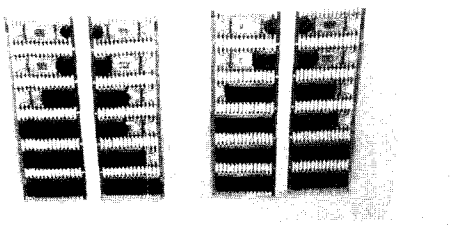

Fig. 3. Chip encapsulation process.

$$p = p_0\left(\frac{1}{h_0-\delta}\right)^{2n+1}\left(\frac{1}{t_f}\right)^n e^{\frac{2T_b}{(T_m+T_w)}} \tag{16}$$

위식으로부터 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\frac{dp}{p} &= \left((2n+1)\left(\frac{1}{h_0-\delta}\right)\frac{\partial\delta}{\partial t}-\frac{n}{t}\right)dt \\ &+\left((2n+1)\left(\frac{1}{h_0-\delta}\right)\frac{\partial\delta}{\partial T_w}-\frac{2T_b}{(T_m-T_w)^2}\right)dT_w \\ &+\left((2n+1)\left(\frac{1}{h_0-\delta}\right)\frac{\partial\delta}{\partial T_m}-\frac{2T_b}{(T_m-T_w)^2}\right)dT_m\end{aligned} \tag{17}$$

여기서

$$\frac{\partial\delta}{\partial t} = \delta_0\left(\frac{T_g-T_w}{T_m-T_g}\right)\left(\frac{2}{3}\right)t_f^{-\frac{1}{3}} \tag{18}$$

$$\frac{\partial\delta}{\partial T_w} = -\frac{\delta_0}{T_m-T_g}t_f^{\frac{2}{3}} \tag{19}$$

$$\frac{\partial\delta}{\partial T_m} = \delta_0\frac{(T_g-T_w)}{(T_m-T_g)^2}t_f^{\frac{2}{3}} \tag{20}$$

위 식으로부터 다음 식을 얻는다.

$$\frac{d\delta}{\delta} = \frac{2}{3}\frac{1}{t_f}dt+\frac{1}{T_w-T_w}dT_w+\frac{1}{T_g-T_m}dT_m \tag{21}$$

여기서 p는 압력, h_0는 캐비티 두께의 1/2, δ_0는 유리화층 두께. t_f는 충전 시간, n은 멱 지수(power law index), L은 캐비티 길이, T_m은 용융액 온도, T_w는 금형 온도, T_b는 파라미터이다.

$$p_0 = \left(\frac{2(1+2n)Lh_0}{n}\right)^n 2K_0L \tag{22}$$

여기서 k는 열전도율, ρ는 고분자 용융액의 밀도, c는 비열을 의미하며, K_0는 어떤 값을 가지는 상수이다. 이상의 방정식으로부터 초기 충전 조건을 구할 수 있다.

3.2. 최적 충전 조건 생성

미성형으로 판정되었을 경우 최적 충전 조건을 구하기 위한 최적화 루틴이 구동되게 되는 데 충전 조건의 최적화는 다음과 같이 공식화되었다.

minimize:

$$F(x) = w_1\frac{t_f - t_{f,1}}{t_{f,u} - t_{f,1}} + w_2\frac{T_w - T_{w,l}}{T_{w,u} - T_{w,l}} + w_3\frac{T_m - T_{m,l}}{T_{m,u} - T_{m,l}} \quad (24)$$

subject to

$$x_i^l \le x_i \le x_i^u,\ i = 1, 2, 3. \quad (25)$$

여기서 t_f는 충전 시간, T_w는 금형온도, T_m은 고분자 용융액 온도이다. w_1, w_2, w_3는 각각 t_f, T_w및 T_m의 가중치이다.

4. 최적화 방안및 적용사례

컴플렉스 방법 (6)이 최적화 알고리즘을 구현하기 위하여 채택되었다. 이 방법은 원 함수의 도함수 정보를 요구하지 않기때문에 원 함수가 트랜스퍼 성형과 같이 대단히 복잡한 경우에 최적해를 구하는 데 있어서 상대적으로 유리하다. 컴플렉스 방법의 자세한 알고리즘은 참고문헌 (6)에 소개되어 있다. 이상에 소개된 프로그램을 이용하여 사례연구를 수행하였다. 채택된 예는 치수 10×4×0.2 (cm)와 10×4×0.12 (cm)인 직사각형 캐비티이다.

사용된 고분자 재료는 폴리카아보네이트이다. 초기 공정 조건은 고분자 용융액 온도 270 deg. C, 충전 시간 2.5초, 금형 온도 90.5 deg. C으로 하였다. Table 1은 두개의 서로다른 제품 두께 2 mm, 1.2 mm에 대해서 각각 얻어진 최적화 결과를 보여 준다. Fig. 4는 제품두께가 1.2 mm인 경우에 있어서 최적화가 진행되는 과정을 나타내고 있다. Fig. 5는 제품두께가 2 mm인 경우에 있어서 최적화가 진행되는 과정을 도시한 것이다. Fig. 6은 각 경우에 있어서 해가 수렴되는 속도를 보여주고 있다. 얻어진 최적 공정 조건을 이용하여 다시 시뮬레이션을 시행한 결과 더 이상 미성형 현상이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 이상의 결과로 볼때 컴플렉스 방법에 의해 구현된 최적화 프로그램은 미성형을 성공적으로 방지할 수 있음을 보여 준다. 초기 공정 조건을 가지고 시뮬레이션을 수행한 결과는 극심한 미성형 현상을 나타내었으나 최적화 과정을 통하여 얻어진 최적 조건을 이용할 경우 미성형 현상이 방지되었다. 최적화 과정을 종료하기 위해 사용된 수렴기준은 2n개의 컴플렉스 점에서 충전 시간의 표준편차에 대해 $\varepsilon=10^{-8}$으로 주어졌고, 두개의 컴플렉스 점간의 최대 거리에 대하여 $\delta=10^{-8}$으로 주어졌다. 이 경우에 있어서 대개 50여회의 반복 계산후에 충전 시간이 성공적으로 수렴되었다.

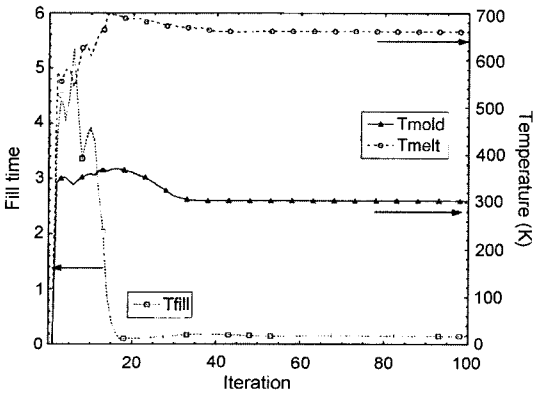

Fig. 4. Obtained optimal results (1.2 mm). Fill time(sec.)

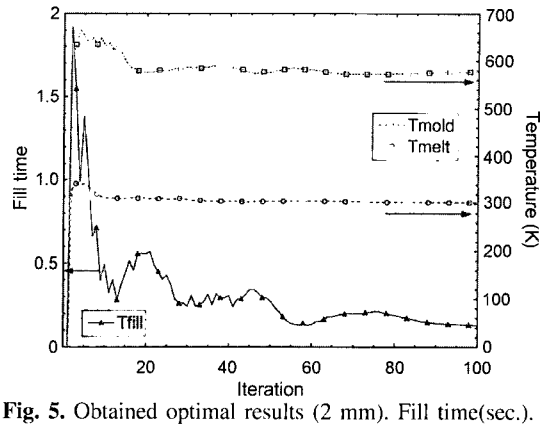

Fig. 5. Obtained optimal results (2 mm). Fill time(sec.).

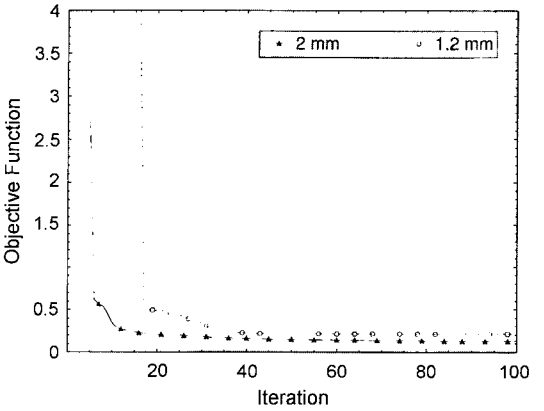

Fig. 6. Convergence rate(objective function vs. iteration no.).

5. 결 론

본 연구에 있어서 반도체 칩 캡슐화 공정의 유동해석을 위한 모델과 해석이 수행되었고, 이 모델을 바탕으로 하여 미성형 판정을 위한 모델과 미성형 해결을 위한 최적화 방안이 제시되었다. 먼저 미성형이 판정되면 최적화 과정이 구동되게 되고 미성형 방지를 위한 최적 조건이 얻어지게 된다. 최적화 과정의 합리화를 위하여 양호한 초기 조건 산정 방안이 연구되었고 성공적인 결과를 얻었다. 공정의 시뮬레이션과 최적화 과정을 통하여 칩 캡슐화 공정의 성형성 평가와 공정 조건의 최적화를 위한 방안이 성공적으로 제시되었다.

기호설명

C_p : 비열
H : 단위체적당 반응열
h : 캐비티 두께의 1/2
k : 열전도 계수
L : 리드프레임의 길이
n : 전단점성에 있어서 멱급수 지수
p : 압력
T : 온도
t : 시간
u : x 방향 속도
v : y 방향 속도
W : 리드프레임에서의 구멍 통과 유속
w : z 방향 속도
Z : b_i에 대해 노멀라이즈된 구멍영역에서의 두께 방향 좌표
z : 두께 방향 좌표
α : 큐어링 정도
γ : 전단률
η : 전단 점성
ρ : 밀도

참고문헌

1. Manzione, L.T., Plastic Packaging of Microelectronic Devices, Van Nostrand Reinhold, New York (1983).
2. Nguyen, L.T., Danker, A., Santhiran, N. and Shervin, C.R., "Flow Modeling of Wire Sweep during Molding of Integrated Circuits", ASME Winter Annual Meeting, Nov. 8-13 (1992).
3. Turng, L. S. and Wang, V. W., "On the Simulation of Microelectronic Encapsulation with Epoxy Molding Compound", SPE RETEC, Raleigh, North Carolina, Nov. 10-12, 92 (1991).
4. Pandelidis, I. and Zou, Q., "Optimization of Injection Molding Design:part 2:Molding Conditions Optimization", Polymer Engineering and Science, 30(15), pp 883-892 (1990).
5. PACK3DM2: Software available to members of the Industrial Consortium of the Cornell Injection Molding Program (CIMP).
6. Reklaitis, G. V., Ravindran, A. and Ragsdell, K. M., Engineering Optimization: Methods and Applications, John Wiley and Sons (1983).
7. Bird, R. B., Armstrong, R. C. and Hassager, O., Dynamics of Polymeric Liquids, Wiley-Interscience, New York, 1 (1987).
8. Hieber, C. A. and Shen, S.F., "A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection Molding Filling Process", J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics 7, 1-32 (1980).
9. Chiang, H. H., Hieber, C. A. and Wang, K. K., "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding", Part I and II, Polymer Eng. Sci., 31, 116-139 (1991).
10. Isayev, A. I. (Editor), Injection and Compression Molding Fundamentals, Marcel Dekker, New York (1987).
11. Kim, S. G., Knowledge-based Synthesis System for Injection Molding, Ph.D Dissertation, MIT (1985).
12. White, J. L. and Dietz, W., "Some Relationships between Injection Molding Conditions and the Characteristics of Vitrified Molded Parts", Polymer Engineering and Science, 19(15), 1081-1091 (1979).