

〈연구논문〉

PFPP성형공정의 기포성장에 관한 모델링

김동학 · 안경현

제일모직 화성연구소
(1996년 7월 10일 접수)

Modeling of Void Growth in Partial Frame Process

Dong-Hak Kim and Kyung Hyun Ahn

R&D Center, Chemicals Division, Cheil Industries Inc.,
332-2 Gochun-dong, Euiwang-shi Kyoungki-do 437-010, Korea
(Received July 10, 1996)

요 약

사출성형은 많은 장점과 유용성에도 불구하고 싱크마크나 휨과 같은 변형문제를 피하기 어렵다. 이것은 성형품의 부위별 온도분포 및 냉각속도 차이에 의한 잔류응력에 기인하는 것으로 구조가 복잡하거나 크기가 큰 경우에 더욱 더 문제가 되기 쉽다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 성형품의 내부에 기포를 형성시켜 수지의 수축분을 기포의 성장으로 보상하여 주는 가스사출성형이 개발되어 많이 활용되고 있는 실정이다. 한편 일반 가스성형과 달리 수지를 완전히 채운 후 저압의 공기를 이용하여 기포를 발생시켜 수지의 체적수축분을 보상해주는 PFPP(Partial Frame Process) 성형기술은 가스사출의 난점인 공기의 유동조절 문제를 해결하고 비용이 저렴한 등의 잇점을 가지고 있다. 이 과정은 가스성형공정의 2차 침투과정과 매우 유사하나 아직까지 이에 대한 이해나 연구는 매우 부족한 실정이다. 본 연구는 기포의 성장이 수지의 체적수축에 의한 것이라는 가정에 근거하여 기포성장길이에 관한 모델링을 수행한 것이다. 실험결과와의 비교를 통하여 기본 가정에 대한 타당성을 검증하고 여러 인자들의 영향을 살펴보았다. 본 연구는 PFPP성형공정에 대한 이해를 증진시켜 금형설계 및 성형조건 설정에 대한 가이드라인을 제시하며, 아울러 PFPP공정에 대한 보다 체계적인 이해 및 일반가스성형의 2차 침투과정 등의 관련 현상에 대한 이해 및 연구에 도움이 될 것으로 기대된다.

Abstract—In partial frame process (PFPP), the void core is generated by imposing the low pressure air into the mold-part just after the resin is completely filled, afterwhich the void grows as it compensates the volume shrinkage of resin. It looks like a secondary gas penetration of the gas-assisted injection molding but has more advantages. Simple process, easy control, cheap utility are the examples. Modeling of the void growth in PFPP was carried out by assuming that the shrinkage due to cooling is completely compensated by the growth of void. By comparing the results with the experimental data, basic assumptions have been justified and the mechanism of the void growth could be explained in terms of the process parameters. This work is expected to help understand the secondary gas penetration of the gas-assisted injection molding as well as the PFPP.

Keywords: PFPP (Partial Frame Process), Gas-Assisted Injection Molding, void growth, void length, shrinkage, gas penetration.

1. 서 론

사출성형은 열가소성 수지를 가공하는 대표적인 기술로서 복잡한 형상의 제품을 제조하는데 유리하고 생산성이 뛰어나다는 등의 장점을 갖는 반면 고분자의 수축으로 인하여 싱크마크(sink mark)와 같은 성형불량이 발생하는 등의 문제를 안고 있다. 이는 주로 성형품의 부위별 두께차이 및 냉각속도 차이로 인한 온도차로 인해 발생하는 잔류응력에 기인하며 이러한 결점을 극복하기 위하여 사출충전에 이어 고압의 보압을 걸어주는 것이 일반적이다. 이 경우에도 수지의 높은 점도로 인하여 압력손실이 크게 발생하고 게이트에서 멀리 떨어진 부위까지 압력이 미치지 어려워 성형품의 부위에 따른 압력차가 많이 발생하는 등의 원인으로 인해 휨(warpage)과 같은 변형의 문제가 발생할 수 있다. 특히 성형품의 전체 또는 일부가 두꺼운 경우 싱크마크를 피하기 위한 정도의 충분한 수지 보압이 곤란하여 제품의 품질을 보장하기에는 한계가 있다.

이러한 일반 사출성형의 단점을 보완한 것이 가스성형 기술이다. 이는 수지의 성형중에 금형내부로 기체를 주입함으로써 제품 내부에 중공부가 있는 성형품을 만드는 기술로서, 냉각이 상대적으로 늦은 두꺼운 부위의 싱크마크 등의 결함을 해소하고 고압의 보압을 사용하지 않음으로써 휨등의 내부변형 문제를 완화시켜주는 등의 잇점이 있다. 이러한 특성은 일반사출에서는 어려운 두꺼운 부분과 얇은부분이 공존하는 제품설계를 제약없이 할 수 있게 하고, 두꺼운 부위의 유동지연효과(flow leader)로 인해 사출압력을 현저히 낮추고 사출기의 형체력도 낮출 수 있게 하므로 설계상의 자유도 증가, 품질향상, 원가절감 등의 장점을 얻을 수 있으며, 이로 인해 가스성형은 최근 대형 성형품을 중심으로 그 용도가 크게 확대되어 가고 있다.

가스사출성형은, 첫째, 금형내에 용융수지를 주입하고, 둘째, 용융수지가 금형을 완전히 충전하기 전에 불활성기체로 수지 내부를 중공화시키고(가스유동단계), 셋째, 충전이 완료된 후 고압의 가스로 보압을 유지하여 수지의 체적수축분을 보상하고(2차 침투단계), 마지막으로 성형품 내부의 가스를 방출시킨 후 금형을 열어서 제품을 얻는 공정으로 이루어진다. 한편, PFP(Partial Frame Process)성형법은 기존의 가스사출과 달리 저압의 공기를 이용하여 필요한 부분에만 중공을 만드는 기

술로서 가스유동단계없이 금형내에 수지를 100% 충전시킨 후 저압의 공기를 이용하여 기포를 발생시켜 수지의 체적수축분을 보상하는 기술이다[1,2]. 이 방법은 가스유동단계가 없기 때문에 가스사출의 난점인 가스유동의 조절문제를 피할 수 있고 고압의 질소가스 대신에 값싼 공기를 이용함으로써 비용절감을 기할 수 있으며, 제품설계가 쉽고 장치운영도 간편한 등의 장점을 갖는다.

PFP성형공정에서 수지의 충전 후 인위적으로 발생된 기포는 이후 계속하여 성장하다가 멈추게 되는 데, 이 기포의 성장과정은 가스사출의 2차 침투단계와 매우 유사하다. 이러한 현상은 수지의 체적수축과 관계할 것으로 예상되며, 이에 대한 이해는 제품설계 및 금형제작에 있어서 매우 중요하다. 가스사출성형의 두번째 공정인 가스유동단계에 관하여는 최근 많은 연구가 진행되고 있으나 세번째 공정인 2차침투단계 및 PFP성형에서의 기포성장 현상에 관한 연구는 미미한 실정이다[3-5]. 본 논문에서는 기포의 성장이 수지의 체적수축분과 관계한다는 경험적 사실을 근거로 간단한 모델을 설정하여 기포의 성장길이를 계산하고 이를 통하여 PFP성형공정의 기포성장 메카니즘에 대하여 이해하고 여기에 미치는 공정조건들의 영향을 살펴보기로 한다. 다음 장에서는 각 성형공정의 수지수축 과정을 수지의 PVT변화를 통하여 간단히 설명하고 기포성장길이에 대한 이론적모델은 제3장에서 전개하기로 한다. 모델링의 결과는 먼저 실험결과와의 비교를 통하여 검증하고, 이후 각 공정조건이 미치는 영향에 대하여 살펴보기로 한다.

2. 사출공정에서의 수지의 PVT변화

사출성형은 수지를 고온의 상태로 금형내에 강제로 주입하는 공정으로서 수지는 압력과 온도의 변화를 겪으면서 체적변화를 수반하며, 이러한 온도와 압력에 따른 수지의 체적수축은 최종 성형품에 영향을 주어 싱크마크, 휨 등의 불량을 초래한다. 일반사출성형에서는 금형내에 수지를 충전한 후, 온도변화에 따른 수지의 체적수축분을 보상해 주기 위한 보압공정을 거치는 데 보압으로 인한 수지의 보충이 끝난 후에도 냉각으로 인한 체적수축은 불가피하므로 결국은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 V2만큼의 부피가 수지로 보충되지 못하게 되어 성형품의 불량으로 나타나게 된다(A→C→D→E-I). 단, 그림에서 E, F는 고화온도, G, H는 성형품 취출시의 온도, I

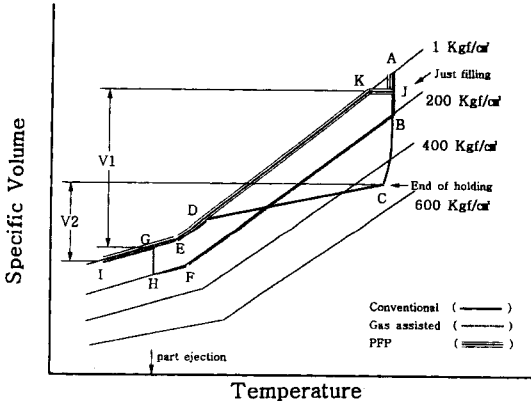


Fig. 1. Schematic diagram of the PVT data. Pathlines of (a) conventional injection molding, (b) gas-assisted injection molding, and (c) PFP are shown.

는 사용온도조건을 나타낸다.

그러나 가스사출성형에서는 수지보압대신 고압의 질소가스를 성형품 내부로 주입시켜 가스보압을 유지한다. 이러한 가스보압은 수지의 체적수축을 내부에서 보상해 줄 뿐 아니라 성형품 각 부위에 균일한 보압효과를 주기 때문에 변형이 적은 제품을 얻을 수 있다(A→B→F→H→G→I). 이에 반해 PFP성형은 금형내에 수지를 100% 채운 후(just filling) 인위적으로 성형품 내부에 기포를 형성시켜 수지의 온도변화에 따른 체적수축분을 기포의 성장으로 대체하는 방법이다(A→J→K→E→I). 기포는 일단 생성되면 수지의 수축현상이 구동력이 되어 자발적으로 성장하게 되고 Fig. 1에 표시된 V1에 해당하는 부피가 성형품 내부에서 기포로 전환된다. 이와 같이 수지의 체적수축력이 기포의 성장과 상쇄되기 때문에 수지의 고화 수축현상으로 나타나는 성형품의 싱크마크, 휨 등의 불량을 방지할 수 있다.

3. 이론적 배경

3.1. 수지수축량

PFPP 성형공정은 수지가 금형내를 100% 채운 직후 성형품의 원하는 부위에 압축공기를 작용시켜 스킨층을 뚫어 기포핵을 만들고, 생성된 기포핵을 시간에 따라 성장시키는 두가지 단계로 구분하여 생각할 수 있다. 기포핵을 만들기 위해 가하는 압력은 5~15 Kgf/cm² 수준의 비교적 낮은 압력이다. 생성된 기포핵이 시간에 따라 성

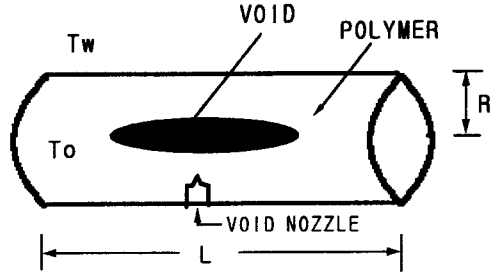


Fig. 2. Schematic diagram of the process.

장하는 과정은 수지의 체적수축과 관련이 있을 것으로 추정되며 이와같은 가설에 근거하여 다음과 같은 모델링을 설정하기로 한다.

Fig. 2에 나타난 바와같이 반지름이 R이고 길이가 L인 원통형의 금형내에 고온의 수지가 100% 채워진 상태로 사출성형되어 있고, 이 때 금형온도는 T_w, 수지온도는 T_o라고 가정하자. 냉각에 의하여 수지온도는 점차로 떨어지고 기포는 시간이 흐르면서 성장을 진행한다. 기포의 성장속도와 길이를 구하기 위하여는 수지의 시간에 따른 체적변화를 먼저 고려하여야 하며 이는 고분자의 상태방정식을 통하여 결정될 수 있다. 시간에 따른 수지의 온도로부터 상태방정식을 통하여 수지의 체적변화를 구할 수 있고 이로부터 기포의 부피 및 기포의 성장길이를 구할 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 일반적으로 사출해석 등에 널리 사용되고 있는 수정된 Tait식(modified Tait equation)을 사용하기로 하며 [6], 그 형태는 다음과 같다.

$$v(T, p) = v_o(T) \left(1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right) + v_i(T, p) \quad (1)$$

$$\text{if } T > T_i(p), v_o = b_1 m + b_2 m \bar{T}$$

$$B(T) = b_3 m \exp(-b_4 m \bar{T})$$

$$v_i(T, p) = 0 \quad (2)$$

$$\text{if } T < T_i(p), v_o = b_1 s + b_2 s \bar{T}$$

$$B(T) = b_3 s \exp(-b_4 s \bar{T})$$

$$v_i(T, p) = b_7 \exp(b_8 T - b_9 p) \quad (3)$$

여기서 전이온도 T_i는 결정성 고분자인 경우 결정의 용융온도이며 무정형 고분자인 경우 유리전이온도(T_g)가 된다. 식 (1)의 C는 일반상수로서 0.0894의 값을 가지며 \bar{T} 는 $\bar{T} = T - b_5$ 로 정의된다.

이상의 상태방정식으로부터 온도와 압력의 함수로서 수지의 비체적이 결정되며 이의 시간에 따른 변화로부터 수지의 체적수축을 구할 수 있다.

한편 기포로 대체가 가능한 수지의 체적수축량 V 는 기포핵이 최초로 발생하였을 때의 비체적과 수지가 충분히 냉각되어 더 이상의 기포성장이 일어나지 않는 때의 비체적의 차이에 의해 결정되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = M(v(T_0) - v(T_f)) \quad (4)$$

여기서 M 은 금형에 채워진 수지의 질량이므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 T_f 는 수지가 최종적으로 냉각된 온도를 의미한다.

$$M = \frac{\pi R^2 L}{v(T_0)} \quad (5)$$

여기서 $v(T_0)$ 는 온도가 T_0 일때의 수지의 비체적이며 T_0 는 충전 직후의 수지온도이다. 따라서 기포로 대체 가능한 수지의 체적수축량은 다음과 같은 온도의 함수로 나타낼 수 있으며 충전 직후의 수지온도와 최종 냉각된 수지온도에 의하여 결정된다.

$$V = \pi R^2 L \frac{v(T_0) - v(T_f)}{v(T_0)} \quad (6)$$

마찬가지로 하여 시간 t 에서의 수지의 체적수축량은 그때의 평균온도 T 와 충전 직후의 수지온도 T_0 의 차이에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$V_v = \pi R^2 L \frac{v(T_0) - v(T)}{v(T_0)} \quad (7)$$

단, 여기서 주의할 점은 Fig. 1 및 식 (2)와 (3)에서 보듯이 비체적이 전이온도 T_i 를 기준으로 서로 다른 속도로 변화한다는 점이다. 따라서 수지온도의 값에 따라서 비체적은 서로 다른 함수에 의하여 결정될 수 있으며, 또한 전이온도 이하의 온도에서는 그림의 낮은 기울기로부터 수지의 수축은 매우 작게 되고, 대부분의 수축이 전이온도 이상의 고온의 수지가 냉각되는 과정에서 발생하게 된다는 사실을 알 수 있다.

3.2. 수지온도

식 (7)에서 알 수 있듯이 수지온도를 시간의 함수로 구할 수 있다면 시간에 따른 기포의 성장속도와 길이를

얻을 수 있다. 그러나 냉각시간에 따른 금형내의 수지온도의 변화를 엄밀하게 예측하는 것은 매우 어렵다. 이는 고분자가 냉각 고화되면서 상변화를 수반하고 고분자 내부에 온도구배가 존재하는 등 많은 요인들이 복잡하게 작용하기 때문이다. 여기서는 시간에 따른 수지온도를 구하기 위하여 다음과 같은 원통형의 형상에 대한 열전달 방정식을 고려하기로 한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (8)$$

$$T = T_0 \quad \text{at } t = 0$$

$$T = T_w \quad \text{at } r = R, \quad \partial T / \partial r = 0 \quad \text{at } r = 0 \quad (9)$$

여기서 r 은 원통의 반경방향의 거리이며 α 는 열확산계수이다. $\alpha = k / \rho C_p$ 로 정의되며 k 는 열전도도, ρ 는 수지밀도, C_p 는 열용량을 의미한다. 이 식에서 알 수 있듯이 수지의 온도는 시간과 거리의 함수로 주어지게 된다. 한편, 기포층이 내부에 존재하고 있을 때, 열전달 방정식의 경계조건은 엄밀하게는 식 (9)와는 달리 주어지게 되나, 이 경우 해석적으로 해가 구해지지 않으며, 수치적분을 수행하여야만 한다. 또한 이 때에는 기포층의 형상에 대한 구체적인 설정이 전제되어야 하며, 특히 초기시간대의 기포성장에 대한 이해가 요구된다. 본 연구에서는 기포의 동력학을 상세히 고려하지 않으므로 이러한 효과를 무시하기로 한다. 한편, 수지의 열전도도, 열용량, 밀도의 온도의존성을 무시하고 금형과 수지사이의 열전달저항이 없어 금형표면에 접한 수지의 온도가 금형온도와 동일하다고 가정한다면 식 (8)의 해는 다음과 같은 과정을 통하여 얻을 수 있다. 먼저 다음과 같은 무차원 변수를 정의하면

$$u = \frac{T_w - T}{T_w - T_0}, \quad s = \frac{t}{t_0}, \quad \xi = \frac{r}{R}, \quad D = \frac{\alpha t_0}{R^2} \quad (10)$$

식 (8)과 (9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial s} = D \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) \quad (11)$$

$$u = 1 \quad \text{at } s = 0$$

$$u = 0 \quad \text{at } \xi = 1, \quad \partial u / \partial \xi = 0 \quad \text{at } \xi = 0 \quad (12)$$

이 식의 해는 다음과 같이 유도될 수 있으며

$$u(\xi, s) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\lambda_n D s} J_0(\sqrt{\lambda_n} \xi) \quad (13)$$

여기서 $J_0(\sqrt{\lambda_n}\xi)$ 는 다음과 같이 정의되는 0차 Bessel함수이다.

$$J_0(x) = \left(\frac{1}{2}x\right)^v \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{1}{4}x^2\right)^k}{k! \Gamma(v+k+1)} \quad (14)$$

λ_n 은 고유치로서 $\lambda_n = \eta_n^2$ 으로부터 결정되며 η_n 은 $J_0(x) = 0$ 를 만족하는 근이다. 또한 상수 C_n 은 초기조건과 고유함수의 직교성으로부터 다음과 같이 구할 수 있으며 $J_1(\sqrt{\lambda_n})$ 은 1차 Bessel함수이다.

$$C_n = \frac{2}{\sqrt{\lambda_n} J_1(\sqrt{\lambda_n})} \quad (15)$$

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 수지온도는 위치와 시간의 함수로 주어지며 따라서 수지의 수축과 기포의 성장도 위치와 시간의 영향을 받게 될 것이다. 하지만 기포의 형성은 기포핵을 중심으로 끝이 가늘어지는 원통형의 모습을 띠게 되며 반경방향의 빠른 냉각으로 인하여 주로 축방향으로 길게 성장되어 간다. 수지수축의 방향은 온도구배에 의존하겠지만, 반경방향의 영향이 지배적일 것으로 예상된다. 따라서 주어진 시간에서의 수지수축량은 초기의 수지온도와 반경방향의 평균온도에서의 비체적 차이에 의하여 결정될 것으로 볼 수 있다. 반경방향의 평균온도는 다음과 같이 시간간의 함수로 주어지며 이로부터 수지수축량이 결정된다.

$$u_{av} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\lambda_n D_s}}{\lambda_n} \quad (16)$$

3.3. 기포성장길이

이상의 결과로부터 수지수축으로 인한 기포의 체적을 알 수 있다. 기포의 성장길이를 구하기 위해서는 기

포의 성장모습을 살펴보아야만 하는 데 실험적으로 관측된 바에 의하면 기포는 성장할수록 끝이 가늘어지는 원통형상을 갖는다. 하지만 기포의 말단부위를 제외하고는 대체로 균일한 단면적을 갖는 것으로 보이며 그 모습은 원통관으로 대체하여 생각할 수 있다. 기포의 모습이 원통관과 같다고 가정하면 기포의 부피 V 는 $V = \pi r_o^2 l$ 과 같으며 이 때 r_o 는 기포의 반경, l 은 기포의 성장길이이다. 따라서 기포의 성장길이 l 은 다음의 식으로부터 결정된다.

$$l = \left(\frac{R}{r_o}\right)^2 L \frac{v(T_o) - v(T)}{v(T_o)} \quad (17)$$

4. 결과 및 토론

일반적으로 기포의 반경은 기포가 성장하면서 형성되는 잔류여벽두께(금형과 기포층 표면 사이의 거리)에 의하여 결정된다. 가스사출의 경우 잔류여벽두께는 약 1/3R의 값을 갖는데 비하여 PPF공정에서는 이보다 큰 값을 갖게 된다[4]. 이는 기포의 유동이 가스성형과는 비교할 수 없을 정도로 느리기 때문에 고화층이 상대적으로 빨리 형성되어 잔류여벽이 두꺼워지기 때문이다. 기포의 반경은 기포의 성장길이에 크게 영향을 미치므로 매우 주의하여 설정하여야 하나, 이를 사전에 예측하는 것은 무척 어려운 일이다. 따라서 본 논문에서는 먼저 기포반경을 가정하여 기포성장길이를 결정하고, 이렇게 결정된 기포성장길이를 실험결과와 비교함으로써 적절한 기포반경을 추정하기로 한다. 이를 위하여 폴리스틸렌(PS) 수지를 대상으로 기포성장길이를 계산하였으며, 계산에 적용된 PS의 물리상수 및 금형조건은 Table 1, 2와 같다.

Fig. 3은 PS의 기포성장길이를 시간의 함수로서 계산한 결과이다. 기포반경은 $r_o = 0.45R$ 과 $r_o = 0.5R$ 의 두

Table 1. Physical properties of PS

PVT parameters				Thermal Parameters	
b1 _m	0.000986 m ³ /Kg	b1 _s	0.000986 m ³ /Kg	Tg	100°C
b2 _m	6.36×10 ⁻⁷ m ³ /Kg · K	b2 _s	2.07×10 ⁻⁷ m ³ /Kg · K	α	9.44×10 ⁻¹⁰ m ³ /s
b3 _m	1.9×10 ⁸ Pa	b3 _s	2.61×10 ⁸ Pa		
b4 _m	0.004109 1/K	b4 _s	0.004916 1/K		
b5	373.15 K	b7	0 m ³ /Kg		
		b8	0 1/K		
		b9	0 1/Pa		

경우에 대하여 계산하였다. 기포성장길이는 기포가 충분히 성장하기 전의 짧은 시간에서는 빠르게 증가하며, 수지온도가 유리전이온도에 도달하면서 약간의 증가를 보이다가 일정한 값에 도달한다. 이는 수지의 냉각과정에 따라 Fig. 2에서 알 수 있듯이 높은 온도에서는 수지의 비체적감소가 빠르고 유리전이온도 이하의 낮은 온도에서는 이미 상당 부분 고화되어 비체적의 감소가 매우 적기 때문이다. 또한 기포성장길이는 기포가 빠르게 성장하는 짧은 시간에서는 거의 차이를 보이지 않다가 시간이 경과하면서 기포반경에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그림의 심볼은 가시화 금형을 이용하여 기포의 성장을 고속카메라로 촬영하여 구한 실험 결과이다 [7]. 실제 실험에서는 기포핵을 만들기 위하여 스킨층을 뚫기 위한 공기압이 필요하고, 가해진 공기압으로 기포가 생성되기까지 수초의 시간이 걸리게 된다. 하지만 모델링에서는 기포핵의 생성을 전제로 기포의 성장만을 고려한 것이므로 이와 같은 지연시간의 차이를 고려하여야 하며, 여기서는 실제 측정치를 지연시간만큼 빼 주었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 기포반경이 0.45R 일 때 이론치는 실험결과와 잘 일치하며, 이는 기포의 성장이 수지

의 수축에 의한 것이라는 본 모델의 가정이 합당하다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 금형온도의 변화에 따른 기포성장길이를 나타낸 결과이다. 다른 조건들을 동일하게 놓고 금형온도를 각각 40, 50, 60°C로 변화시킨 결과, 기포의 성장추이는 거의 같고 금형온도가 높아질수록 기포성장길이가 다소 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 금형온도가 높아짐에 따라 수지온도와 금형온도의 차이가 작게되므로 체적수축분이 작아지게 되기 때문이며, 이 경우 냉각의 구동력이 약하게 되어 유리전이온도에 도달하는 시간도 다소 늦어지게 된다.

Fig. 5는 수지온도의 영향을 보여주며, 수지온도가 높아질수록 기포성장길이는 비슷한 모습으로 증가함을 알 수 있다. 이는 수지온도가 올라갈수록 수지온도와 금형온도의 차이가 커져서 비체적의 차이가 더 커지므로 그 성장길이도 더 길게 되기 때문이다. 이 경우 큰 구동력으로 인하여 기포의 성장은 더 빠르게 진행되지만 높은 수지온도로 인하여 유리전이온도에 도달하는 시간은 오히려 늦어지게 된다.

Fig. 6에서는 채널의 크기가 기포의 성장길이에 미치는 영향을 보여주고 있다. 계산은 모두 동일한 기포반경과 채널크기의 관계($r_o = 0.45R$)를 가정하여 수행한 것이다. 실제로는 채널의 크기에 따라서 기포반경과 채널 크기의 관계가 일치하지 않을 수 있을 것이다. 하지만 기포의 성장 모습은 정성적으로 동일할 것이며, 정량적으로도 크게 차이가 나지는 않을 것으로 예상된다. 그림

Table 2. Mold conditions used in the modeling

melt temp.	250°C
mold temp.	40°C
channel diameter	3 mm
channel length	135 mm

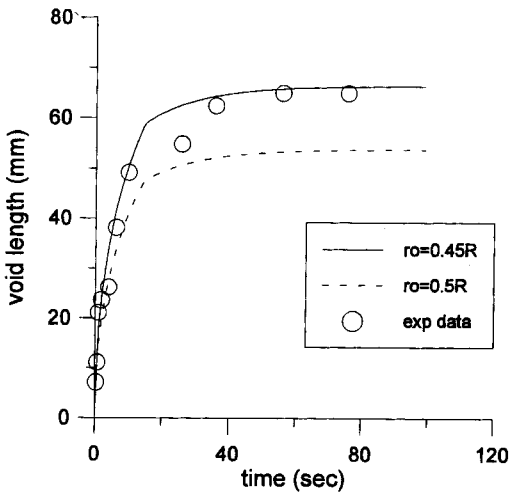


Fig. 3. Comparison of the modeling results with the experimental data.

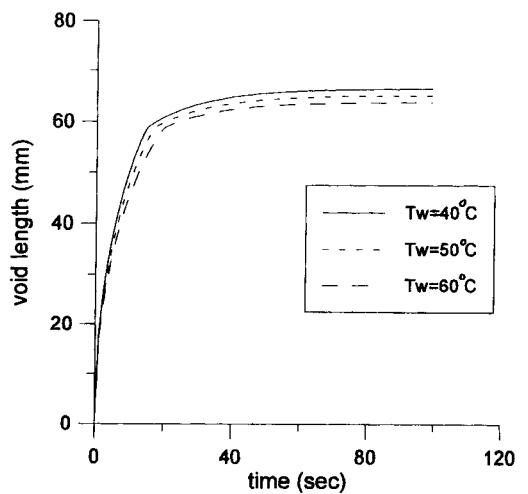


Fig. 4. Effect of mold temperature on void length.

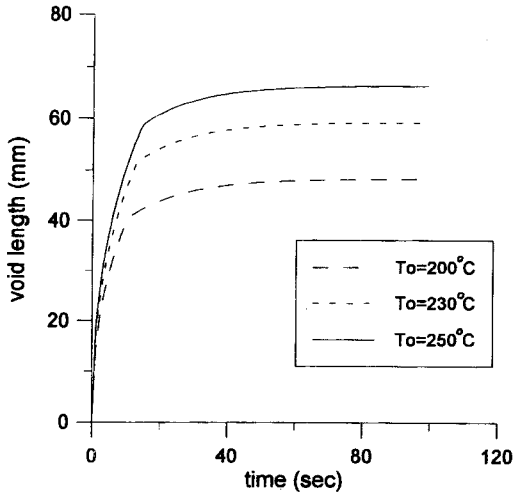


Fig. 5. Effect of melt temperature on void length.

에서 보듯이 채널두께가 달라짐에 따라 기포의 성장률이 및 길이가 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 특히 채널두께가 클수록 기포의 성장속도도 느리고 길이도 현저하게 줄어드는 경향이 있다. 이는 채널두께가 커질수록 기포가 밀어내야 할 수지의 양이 많아져서 유동저항이 커지기 때문이다. 기포성장의 기본적인 구동력은 수지의 체적수축이지만 실제로 기포가 성장하는 데는 저항이 따르게 된다. 기포가 수지를 밀어내면서 유동장이 발생하고 이와 관련하여 수지의 점도가 저항으로 작용한다. 또한 금형이 냉각되면서 벽면부터 고화층이 발달하면 유동할 수 있는 유동층은 줄어들고 이로 인해 기포가 대체할 수 있는 체적수축분이 줄어들게 된다. 따라서 PFP 성형에서 사용하는 공기압은 스킨층을 뚫는 역할뿐만 아니라 기포의 유동에 따른 저항을 극복하는 효과도 있는 것이다. 공기압으로 기포의 유동을 지원함으로써 기포가 수지의 점도저항을 극복하면서 보다 먼 거리를 진행하게 되어 냉각으로 인한 체적 수축분의 최소화할 수 있다.

보다 엄밀한 해석을 위하여는 기포의 동역학에 관한 이해가 수반되어야 하겠으나, Fig. 3에서 확인한 바와 같이 실험결과와 이론치가 잘 맞다는 사실로부터, 세부적인 기포의 거동을 고려하지 않고도, 수지 전체의 수축에 의해 기포성장과정을 개략적으로 살펴볼 수 있었다. 한편, 기포반경을 일정한 값으로 가정한 것은 기포의 동역학에 대한 이해가 부족한 때문으로, 이에 대하여는 향후 충분한 연구가 수행되어야 할 것이다. 또한 기

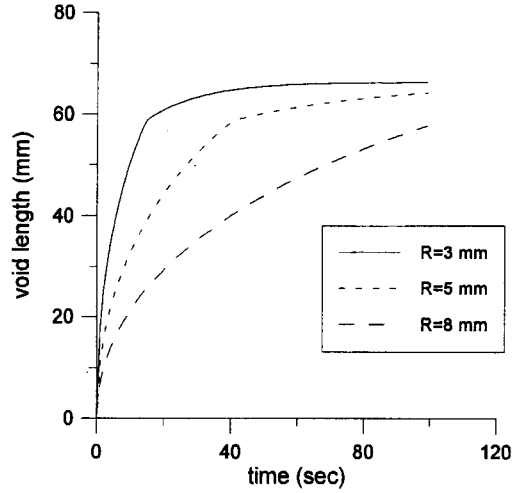


Fig. 6. Effect of channel size on void length.

포의 초기성장과정을 엄밀히 구할 때에는 수지의 열전달 방정식도 식 (9)와는 달리 기포의 크기를 고려한 새로운 경계조건에 따라서 풀어야 할 것이다. 기포반경은 기포생성의 초기시간에는 본 모델에서 가정된 것보다 더 작은 값을 가지며 시간에 따라 증가하다가 일정한 수준이 유지되는 것으로 예상된다. 생성된 기포의 양끝단에서 더 이상 직경이 일정한 원통관의 모습을 유지하지 못한다는 점을 무시한다고 하여도 초기 시간에 따른 기포 직경의 성장에 대하여 이해할 필요가 있다. 기포성장의 초기단계에서는 기포성장길이와 다른 인자의 영향을 적게 받는 것으로 보이지만, 그 성장속도가 대단히 빠르므로 기포의 최종길이는 큰 차이를 보일 수 있기 때문이다. 또한 PFP 성형의 기포성장과정은 일반 가스성형의 2차 침투과정과 매우 유사하므로 본 모델의 결과는 가스성형의 2차 침투과정을 이해하고 연구하는 데에도 도움이 될 것으로 기대된다.

5. 결 론

PPF 성형공정의 기포성장 과정을 기포의 성장이 수지의 체적수축에 기인한다는 가정을 근거로하여 모사하였다. 그 결과 적절한 기포반경이 정의될 때 실험결과를 정량적으로 설명할 수 있었으며, 이로부터 위와같은 가정들의 타당성을 검증할 수 있었다. 기포의 성장길이는 시간에 따라 급속히 증가하고, 수지가 고화되기 시작하면서 좀 더 증가하다가 일정한 값에 도달하게 된다. 기

포성장길이는 금형온도가 높을수록 감소하고, 수지온도가 높을수록 증가하고, 또한 채널두께가 두꺼울수록 기포의 성장은 늦어지고 길이도 짧아진다는 것을 알 수 있었다. 아울러 본 모델에서 고려하지 않은 기포의 동역학 및 기포반경에 대한 연구의 필요성을 언급하였으며, 가스성형의 2차 침투과정과의 유사성을 고려하여 본 모델의 결과가 가스성형에 대한 이해에도 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 저자는 가시화 금형 실험결과를 제공해 준 일본 신일철화학 주식회사 고분자 연구소의 H. Aida씨에게 감사드립니다.

사드립니다.

참고문헌

1. US Patent 5,232,654 (1993).
2. 김동학, 고분자과학과 기술, 7(3), 303 (1996).
3. A. J. Polinski, P. R. Oehler, and V. K. Stokes, *Polym. Eng. Sci.*, **35**(11), 877 (1995).
4. F. Johannaber, K. Konejung, and P. Plaetschke, *Kunststoffe Plast. Europe*, June, 6 (1995).
5. W. Michaeli and H. Findelson, Proceedings of the 11th Annual Meeting of PPS, 127 (1995).
6. "C-MOLD Reference Manual," Advanced CAE Technology Inc., New York, 1995, p.2-12.
7. H. Aida, private communication (1995).