The Korean Journal of Rheology,
Vol. 9, No. 2, June 1997 pp. 60-65

<연구논문>

PFP성형공정의 기포성장 메카니즘에 관한 연구

김동학 · 안경현
제일모직 화성연구소
(1997년 4월 7일 접수)

Analysis of the Void Growth Mechanism 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 April 7, 1997)

요 약

PFP (Partial Frame Process) 성형기술은 사출성형시 수지를 금형내에 완전히 채운후 저압의 공기를 이용하여 기포를 발생시켜 수지의 체적수축분을 기포의 성장에 의해 보상해주는 기술이다. 이 방법은 일반 사출성형에서 많이 발생하는 싱크마크나 휨과 같은 변형문제를 해결하여 줄 수 있으며, 높은 압력을 필요로하지 않는다는 잇점을 가지고 있으나 이러한 최신 공정에 대한 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 최근에 제시된 PFP성형공정의 모델링은 기포의 성장이 수지의 체적수축에 의한 것이라는 가정을 근거로 기포핵이 생성된 이후의 기포성장을 모사하였으며, 모델링의 해석결과는 몇가지 가정에도 불구하고 실험결과를 잘 설명하였다. 본 연구에서는 모델링이 가지는 문제점을 분석하고 기포성장의 메카니즘을 보다 체계적으로 이해하기 위하여 실험적인 방법을 적용하였다. 많은 인자들을 효과적으로 고려하기 위하여 실험계획법을 적용하였으며 이를 통하여 기포핵의 생성과 기포의 성장에 공기압 등이 매우 중요한 역할을 한다는 사실을 확인하였다. 이러한 결과는 모델링과 함께 PFP공정에 대한 체계적인 이해 뿐만 아니라 금형설계 및 성형조건의 설정 등 실제적인 문제 해결에도 도움이 될 것으로 기대된다.

Abstract— Partial Frame Process (PFP) is one of the injection molding techniques, in which the void core is generated by imposing the low pressure air into the molded part just after the resin is completely filled, afterwhich the void grows as it compensates the volume shrinkage of resin. This technique can help to cure the deformation problems in common injection molding processes such as sink mark and warpage, with less pressure and more benefits. In spite of its advantages, systematic study is lacking and not enough is known about this process. Recently, we have modeled the void growth in PFP, and could explain the experimental data quite successfully in spite of some assumptions. In this study, experimental approach was taken in order to obtain more systematic understanding about the mechanism of void growth in PFP. As there are many factors affecting the process, the design of experimentals was adopted. The contributions of each factor was cleared, and it was found that the air pressure plays key roles in the generation and growth of void among the many factors. Together with the results of modeling, this study is expected to help our understanding of this new process as well as the mold design and the determination of the operating conditions.
Keywords: PFP (Partial Frame Process), void growth, void length, shrinkage, design of experiments, injection molding

1. 서 론

PFP (Partial Frame Process) 성형기술 [1,2]은 사출성형시 수지를 금형내에 완전히 채운후 저압의 공기를 이용하여 기포를 발생시켜 수지의 체적수축분을 기포의 성장에 의해 보상해주는 기술이다. 이 방법은 사출성형에 비하여 싱크마크나 휨과 같은 성형불량 문제를 해결하여 줄 수 있으며, 높은 압력을 필요로하지 않는다는 잇점을 가지고 있다. 이와 유사한 방법인 가스사출성형은 같은 목적을 가지고 개발되었지만, 수지가 금형내를 완전히 충전하기 전에 불활성기체로 수지내부를 중공화시키고 (가스유동단계) 충전이 완료된 후에 고압의 가스로 보압을 유지하여 수지의 체적수축분을 보상한다 (2차침투단계)는 점에서 PFP성형방법과는 차이가 있다. PFP성형방법은 저압의 공기를 이용하여 필요한 부분에만 중공을 만드는 기술로서 가스유동단계없이 금형내에 수지를 100% 충전시킨 후 저압의 공기를 이용하여 기포를 발생시켜 수지의 체적수축분을 보상해주므로 가스사출의 최대 단점인 가스유동의 조절문제를 피할 수 있고 고압의 질소가스 대신에 값싼 공기를 이용할 수 있으며 장치비용이 저렴하며 제품설계가 쉽고 장치운영도 간편한 등의 장점이 있다. 이러한 방법들은 대형 성형품을 중심으로 그 용도가 점차 확대되어 가고 있으나, 이에 대한 연구는 충분치 못하다. 가스사출의 경우 가스유동단계에 대한 연구는 비교적 활발히 진행되어 왔으나[3-5] PFP성형의 기포 성장과정과 유사할 것으로 보이는 2차침투단계에 관한

연구는 거의 미미한 실정이다. 본 저자들은 최근 기포의 성장이 수지의 체적수축분과 관계한다는 가정으로부터 기포핵이 생성된 이후의 기포성장 과정을 모델링하여, 실험적으로 관찰되는 기포성장의 모습을 이론적으로 설명하였다. 상기 모델링은 실험결과를 잘 설명하고 금형온도, 수지온도, 채널두께 등의 영향을 예측하여 공정에 대한 이해 및 제품설계에 도움을 주기는 하지만, 고려할 수 있는 인자의 수가 제한되어 공기압과 같은 중요 인자에 대한 고려가 가능하지 않고 초기의 기포생성과정을 해석하지 못하여 간단한 구조에 대하여만 해석이 가능하다는 점에서 공정에 대한 충분한 이해를 제공한다고 보기는 어렵다. 이에 본 연구에서는 상기 모델링의 장단점을 분석하고, 실제 성형시 중요하게 작용하는 인자들의 영향을 실험적으로 살펴보기로 한다. 또한 작용하는 인자들의 수가 많으므로 이들의 영향을 객관적으로 살펴보기 위하여 실험계획법을 적용하여 각 인자들이 공정에 미치는 영향을 살펴보기로 한다. 먼저 다음장에서는 모델링의 개요와 장단점을 분석하고, 다음으로 실험계획법에 의한 인자들의 설계 및 요인분석을 실시하고 끝으로 PFP성형공정에 미치는 각 인자들의 영향, 작업 및 설계조건에 대한 가이드라인 그리고 향후의 연구 과제에 대하여 언급하기로 한다. 이러한 연구는 모델링과 함께 PFP공정에 대한 체계적인 이해 뿐만 아니라 금형설계 및 성형조건의 설정 등 실제적인 문제 해결에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

2. 모델링의 개요

Fig. 1과 같이 반지름이 R이고 길이가 L인 원통형의 금형내에 고온의 수지가 100% 채워진 상태로 사출되어 있고, 이 때 금형온도는 Tw, 수지온도는 To라고 하면, 냉각에 의하여 수지온도는 점차 떨어지고 수지의 냉각으로 인한 체적변화로 인해 기포는 시간이 흐르면서 성장을 진행한다. 실제 금형과 달리 Fig. 1과 같은 단순화된 모델에서는 수지온도는 다음과 같은 열전달 방정식에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

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

$$T = T_o \text{ at } t = 0$$

$$T = T_w \text{ at } r = R,\ \partial T/\partial r = 0 \text{ at } r = 0 \qquad (1)$$

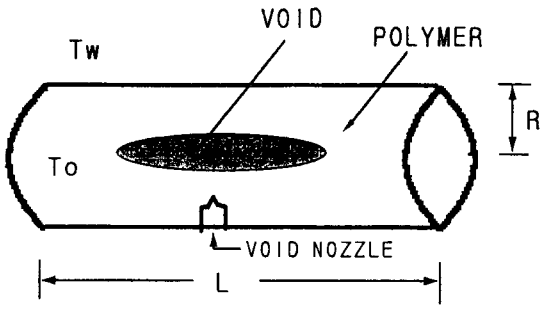

Fig. 1. Schematic diagram of the PFP process.

여기서 r은 원통의 반경방향의 거리이며 α는 열확산계수이다. α는 $\alpha=k/\rho C_p$로 정의되며 k는 열전도도, ρ는 수지밀도, C_p는 열용량을 의미한다. 이 식에서 알 수 있듯이 수지의 온도는 시간과 거리의 함수로 주어지게 된다.

수지온도가 결정되면 수지의 체적변화는 수정된 Tait식 [7]에 의하여 결정될 수 있으며, 이로부터 기포의 부피가 결정된다. 한편 기포로 대체 가능한 수지의 체적수축량 V는 기포핵이 최초로 발생하였을 때의 비체적과 수지가 충분히 냉각되어 더 이상의 기포성장이 일어나지 않을 때의 비체적의 차이에 의해 결정되므로 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$V = M(v(T_o) - v(T_f)) \qquad (6)$$

금형에 채워진 수지의 질량 M은 다음과 같으므로

$$M = \frac{\pi R^2 L}{v(T_o)} \qquad (7)$$

시간 t에서의 수지의 체적수축량은 그 때의 온도 T와 사출충전 직후의 수지온도 T_o의 차이에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$V_v = \pi R^2 L \frac{v(T_o) - v(T)}{v(T_o)} \qquad (8)$$

기포의 모습이 원통관과 같다고 가정하고 r_o가 일정하다면, 기포의 부피는 $V_v=\pi r_o^2 l$와 같으며, 따라서 기포의 성장길이 l은 다음과 같다.

$$l = \left(\frac{R}{r_o}\right) L \frac{v(T_o) - v(T)}{v(T_o)} \qquad (9)$$

좀 더 자세한 모델링에 관해서는 참고문헌 6에 자세히 설명되어 있다.

3. 모델링의 결과 및 문제점

위와 같은 과정에 의하여 폴리스틸렌 수지를 대상으로 기포성장길이를 계산한 결과가 Fig. 2에 주어져 있다. Aida[8]의 실험결과는 Fig. 3과 같은 가시화금형을 이용하여 기포의 성장을 고속카메라로 촬영하여 구한 결과이며, 실제 실험에서 기포핵이 생성될 때까지의 시간을 빼주어 기포핵이 생성된 이후의 결과만을 비교한 것으로 모델링은 실제의 기포성장과정을 잘 설명하여 주고 있다. 이러한 결과는 위에서 제시된 모델링의 가정과 방법이 충분히 타당하다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 이상의 결과를 바탕으로 앞서의 논문에서는 금형온도, 수지온도, 채널두께의 영향을 이론적으로 예측하여 보았다. 그러나 이 모델링에 있어서는 우선 기포핵의 생성과정을 고려하지 못하기 때문에 기포핵의 초기 성장과정을 알 수 없으며 따라서 잔류여벽두께에 대한 정보를 얻을 수 없다는 문제점이 있다. 이러한 이유로 모델링에서는 잔류여벽두께를 적절한 수준으로 가정하여 기포성장길이를 계산하였으며, 실험

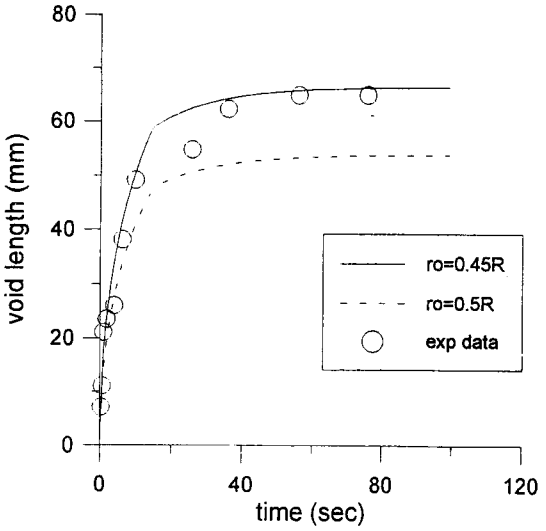

Fig. 2. Comparison of the modeling results with the experimental data.

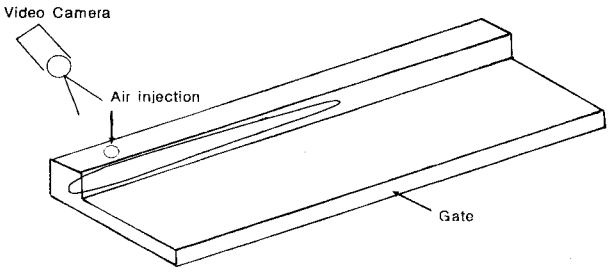

Fig. 3. Schematic diagram of the mold.

결과와의 비교를 통하여 역으로 잔류여벽두께의 수준을 추정하였는 데, 이러한 문제는 앞으로 더욱 연구되어야 할 부분이라 할 수 있다. 또한 식(1)의 경계조건은 영역 내에 수지로만 가득 채워져 있는 경우에 성립하는 조건으로서, 엄밀하게는 본 경우와 같이 금형내에 기포층이 존재하는 경우에는 성립하지 않게 된다. 이 경우에는 기포와 수지의 경계면에서의 경계조건을 주기 위하여 사전에 기포의 모습과 기포반경에 대한 정보가 필요하게 되며, 이를 위하여는 기포의 동력학과 열전달 방정식을 동시에 풀어주어야만 한다. 하지만 수지층 내에서의 기포의 동력학에 관한 이해는 아직 충분하지 못한 이유로 위의 모델링은 이와같은 정밀한 해석 대신에 수지만으로 채워진 금형내의 평균온도에 의해서 수지수축량이 결정되며, 수지수축은 기포의 성장에 의해 보상된다는 가정 하에서 수행된 것이다. 이와같은 가정들은 앞으로의 연구를 통하여 정밀히 검증 및 보완되어야 하겠지만, 실험결과와의 비교를 통하여 볼 때 위의 모델링은 실제 공정을 매우 잘 모사하고 있다는 사실로부터 어느 정도 타당성을 찾을 수 있을 것이다. 또한 이를 통하여 기포의 성장과정에 대한 이해를 증진시킬 수 있었으며, 잔류여벽두께에 대하여도 어느 정도 근접한 예측이 가능하였다. 모델링에서 고려된 인자들은 실제 성형시 조절하여야 하는 인자들의 일부에 불과하며 특히 초기의 기포생성과정을 고려하지 못하기 때문에 전체 공정을 제대로 이해하기 위하여는 공기압을 비롯한 다른 인자들의 영향도 함께 고려하여야 할 것이다 이를 위하여 본 연구에서는 실제 성형시 중요하게 작용할 것으로 예상되는 수지종류, 실린더온도, 공기압, 지연시간, 유지시간 등의 주요 인자들에 대한 영향을 실험적으로 살펴보기로 한다.

4. 실험결과 및 토론

본 연구에서는 기포의 성장에 영향을 미칠 것으로 예상되는 5개의 주요한 인자들을 설정하여 그 영향을 살펴보기로 한다. 이들 인자는 수지종류, 실린더온도, 공기압, 지연시간, 유지시간 등이며 Fig. 4에 주어진 시험금형을 통하여 실험하였다.

그림에서 알 수 있듯이 시험금형은 사각 평판(100 mm × 200 mm) 위에 두개의 리브가 있고 각 리브에 보스가 3개씩 설치되어 있는 형태이다. 각 리브의 길이는 150 mm, 높이는 평판 윗면으로부터 15 mm이고, 얇은 리브의 두께는 평판에 접한 부분이 5 mm, 끝단이 2 mm인 반면에 두꺼운 리브의 두께는 평판에 접한 부분이 8 mm, 끝단이 3 mm이다. 리브의 단면을 보면 끝단에서 7mm까지는 거의 일정한 두께이나, 평판으로 내려갈수록 두께가 증가하는 테이퍼(taper) 형태를 취하고 있다. 모든 보스는 보이드 노즐이 삽입되는 부분으로 내경이 6 mm, 외경이 8 mm의 크기를 갖는다. 평판은 밑면에 단차(2, 3, 4 mm)를 주어 금형면으로 부터의 보이드 노즐 간의 길이를 다르게 함으로써 기포가 생성되는 최적 거리를 실험적으로 관찰하기 위한 것이다. 그 결과 금형면에서부터 보이드 노즐 선단까지의 거리가 약 6~7 mm 일때 기포핵이 원활하게 형성된다. 한편 채널두께에 따른 기포의 생성 및 성장길이를 관찰하기 위해 리브의 두께(평판과 만나는 바닥 두께)를 각각 5 mm와 7 mm로 설치하였다. 각 리브에 설치되어 있는 보스구멍에는 보이드 노즐이 삽입되어 기포 형성에 필요한 공기압을 유도한다. 본 실험에서는 가운데 보스에 설치된 보이드 노즐에만 공기압을 공급하여 기포의 성장을 관찰하였다.

실험은 많은 인자들의 효과를 합리적으로 처리하기 위하여 통계적 접근방법인 직교배열법을 이용하였으며 인자간의 교호작용을 무시하기 위하여 L18 직교배열표를 사용하였다 [9]. 수지종류로는 2종의 당사 폴리스틸렌 수지를 대상으로 하였으며

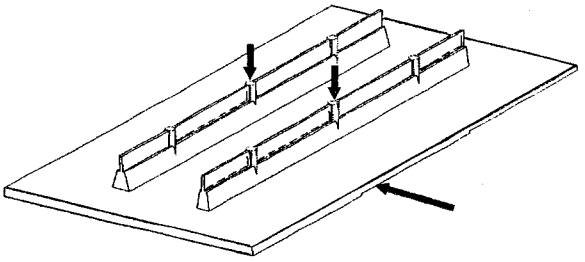

Fig. 4. Schematic diagram of the test mold. Solid arrows indicate the position of air injection and a dotted arrow indicates gate position.

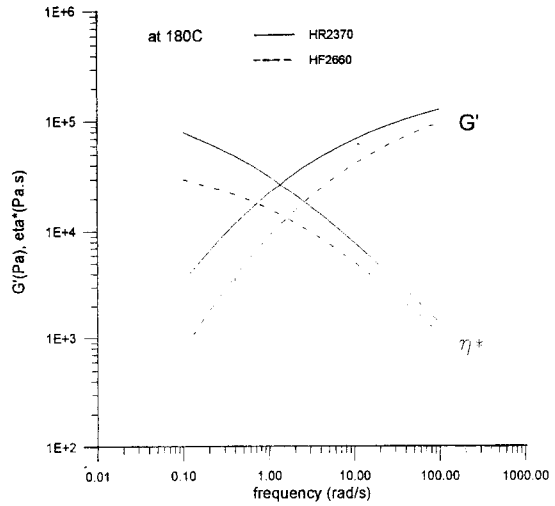

Fig. 5. Rheological properties of the PS samples. Starex HF2660 and HR2370.

이들의 유동특성은 Fig. 5에 주어져 있다. 수지간의 점탄성 차이는 일반적인 사출성형시 조건을 달리 설정하여야 할 만큼 충분히 크게 선정되었으며 200°C, 5 kg 하중에서의 유동지수는 각각 9.5 g/10 min와 2.2 g/10 min이다. 수지종류를 제외한 나머지 인자들은 3수준으로 설정하였으며 각 수준값은 경험을 바탕으로 적절히 결정하였다. 인자 및 수준의 설정은 Table 1에 정리되어 있다. 이에 따라 적용된 직교배열표와 그 실험배열은 Table 2에 주어져 있으며, 두꺼운 채널과 얇은 채널에서 각각 측정된 기포길이가 함께 주어져 있다. 실험번호 10의 결과에서 기포성장길이가 0인 경우는 점성이 큰 수지에 낮은 공기압이 작용하고 지연시간이 길어 미리 냉각된 수지층을 낮은 공기압으로 뚫을 수 없는 경우에 해당되며, 그 외에는 모두 기포가 잘 발달하였다. 각 실험은 평균 7회정도의 반복 실험을 통하여 결과를 얻었으며 각각의 경우에 산포는 충분히 작게 유지되었다.

한가지 특이한 점은 일부 조건에서는 얇은 채널보다 두꺼운 채널에서의 기포의 성장길이가 더 길수도 있다는 점이다. 이는 수지온도가 높고 공기압이 낮을 때 관찰되는 현상으로 두꺼운 채널의 경우 수축될 수 있는 수지의 양이 많아지기 때문으로 보이며, 이 경우 유지시간이나 지연시간은 별 영향을 주지 못하는 것으로 보인다. 수지온도가 높은 경우는 수지온도와 금형온도의 차이가 크게 되어 수지수축의 구동력이 크게 작용하는 것으로 보이며, 공기압의 크기는 기포의 수직방향으로 부터의 수지수축을 다소 억제하는 효과가 있다고도 보인다. 하지만 뒤에서 알 수 있듯이 공기압의 크기는 일반적으로 기포의 성장길이에 결정적으로 영향을 주며 기포성장길이를 증가시키는 방향으로 작용하며, 이러한 효과는 기포의 동력학을 충분히 고려하지 않고는 설명하기 어려운 부분으로 이해된다.

Table 1. Factors and levels for L18 orthogonal arrays

Factor	0 level	1 level	2 level
A. resin type	STAREX HF2660	STAREX HR2370	–
B. melt(cylinder) temperature	190°C	210°C	230°C
C. air pressure	5 Kg·f/cm^2	10 Kg·f/cm^2	15 Kg·f/cm^2
D. delay time	5 sec	10 sec	15 sec
E. hold time	10 sec	20 sec	30 sec

Table 2. L18 orthogonal arrays and the measured void growth length

exp. no	column no	void growth length(mm)	
		thick channel	thin channel
1	0 0 0 0 0 0 0 0	22	32
2	0 0 1 1 1 1 1 1	73	94
3	0 0 2 2 2 2 2 2	85	99
4	0 1 0 0 1 1 2 2	51	29
5	0 1 1 1 2 2 0 0	82	81
6	0 1 2 2 0 0 1 1	78	75
7	0 2 0 1 0 2 1 2	69	38
8	0 2 1 2 1 0 2 0	75	42
9	0 2 2 0 2 1 0 1	83	72
10	1 0 0 2 2 1 1 0	0	0
11	1 0 1 0 0 2 2 1	77	96
12	1 0 2 1 1 0 0 2	71	91
13	1 1 0 1 2 0 2 1	44	49
14	1 1 1 2 0 1 0 2	77	93
15	1 1 2 0 1 2 1 0	91	111
16	1 2 0 2 1 2 0 1	78	37
17	1 2 1 0 2 0 1 2	52	48
18	1 2 2 1 0 1 2 0	87	103

두꺼운 채널과 얇은 채널의 결과에 대한 분산분석표는 Table 3과 4에 각각 주어져 있다. 주어진 인자가 기포의 성장길이에 미치는 영향은 Fo값으로 알 수 있으며, 이 값은 오차의 평균제곱에 대한 해당 인자의 평균제곱의 비로 정의된다. Table에서 Fo값이 클수록 해당 인자는 기포의 성장길이에 크게 영향을 미치며, Fo값이 2보다 작은 경우에는 일반적으로 그 인자의 영향을 무시할 수 있다 [9]. 공기압의 Fo값에 붙은 별표는 99% 유의수준에서 공기압이 기포성장길이에 유의하다는 점을 의미한다. Table의 결과로부터 알 수 있듯이 기포의 성장길이에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 공기압과 유지시간이다. 이러한 결과는 두꺼운 채널과 얇은 채널에서 공통적으로

Table 3. Analysis of variance for the thick channel

facor	sum of squares	degree of freedom	mean squares	Fo
A. resin type	93.39	1	93.39	0.45
B. melt temperature	1273.45	2	636.72	3.08
C. air pressure	4801.45	2	2400.72	11.59**
D. delay time	215.45	2	107.72	0.52
E. hold time	1820.11	2	910.06	4.39
e. error	1656.43	8	207.05	
sum	9860.28	17		

**factors significant at 99% confidence level

Table 4. Analysis of variance for the thin channel

facor	sum of squares	degree of freedom	mean squares	Fo
A. resin type	242.00	1	242.00	0.91
B. melt temperature	859.11	2	429.56	1.61
C. air pressure	11984.78	2	5992.39	22.46**
D. delay time	1027.11	2	513.56	1.92
E. hold time	1310.11	2	655.06	2.45
e. error	2134.66	8	266.83	
sum	17557.78	17		

**factors significant at 99% confidence level

관찰되며, 특히 얇은 채널에서는 공기압의 영향이 더욱 크게 나타난다. Fig. 5에서 보듯이 수지의 유동특성이 상당히 다른데도 불구하고 수지종류가 별 영향을 주지 못하고 있는 것은 그만큼 공기압에 의한 기포성장의 동력학이 중요하다는 것을 의미하며 이러한 부분이 고려되지 못한 모델링의 한계를 엿볼 수 있다. 각 채널에 대한 각 인자의 모평균의 추정치가 Table 5에 각각 주어져 있으며 이에 근거한 각 인자들의 영향을 Fig. 6에 도시하였다. Table 5에서 수지온도가 40℃ 증가함에 따라 두꺼운 채널에서의 기포의 성장길이는 약 50% 증가하며, 이는 모델링의 결과와 잘 일치하고 있다. 하지만 얇은 채널의 경우는 다소 다른 경향을 보이고 있다. 수지종류와 수지온도의 영향이 두꺼운 채널과 얇은 채널에서 각각 반대로 나온 것은 이들 인자들의 기포성장길이에 미치는 영향이 매우 작기 때문에 두꺼운 채널에서의 수지온도의 영향을 제외하고는 실험상의 오차에 기인한 것으로 볼 수 있다. 일반적으로 기포의 길이가 길수록 싱크마크나 휨과 같은 성형불량이 적어져 제품의 성질에 유리하다는 점을 고려할 때, 이상의 결과로부터 변형으로 인한 성형불량을 줄이기 위해서는 공기압과 유지시간을 크게 가져가는 쪽이 유리하다고 볼 수 있다. 단, 공기압과 유지시간을 충분히 크게 가져간다고 하더라도 지연시간이 지나치게 크게되면 기포자체가 형성되지 않게 되

Table 5. Response table

factor	level	mean response	
		thick channel	thin channel
A. resin type	0	68.67	62.44
	1	64.11	69.78
B. melt temperature	0	54.67	68.67
	1	70.50	73.00
	2	74.00	56.67
C. air pressure	0	44.00	30.83
	1	72.67	75.67
	2	82.50	91.83
D. delay time	0	62.67	64.67
	1	71.00	76.00
	2	65.50	57.67
E. hold time	0	57.00	56.17
	1	61.83	65.17
	2	80.33	77.00

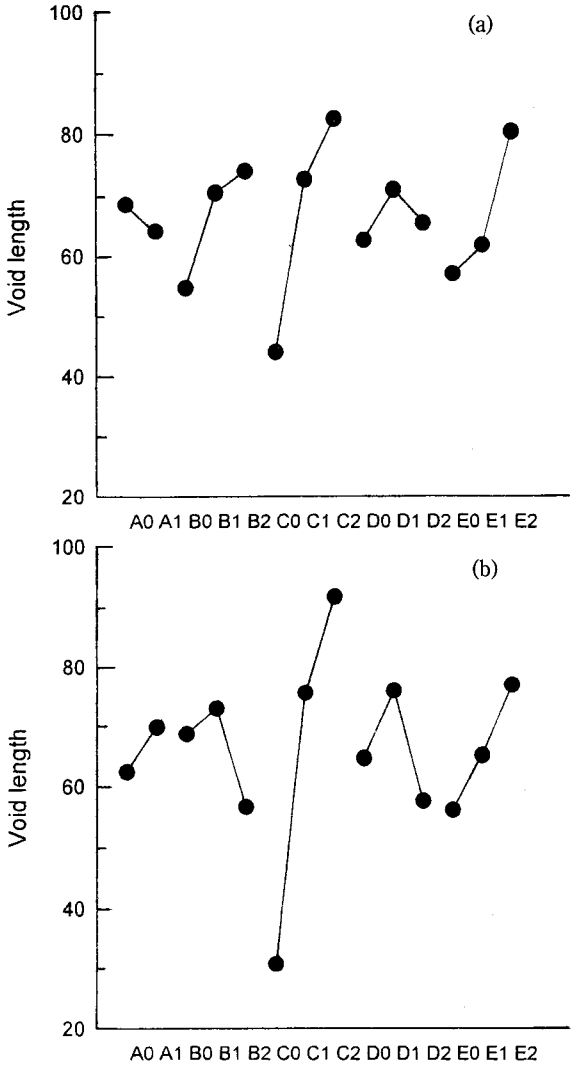

Fig. 6. Parameter effects on the void growth length. (a) thick channel, (b) thin channel.

므로 적절한 조건의 설정은 매우 중요하게 된다. 주의하여야 할 점은 이상과 같은 실험계획법의 결과는 Table 1에 주어진 바와 같이 최초 계획된 실험범위 내에서만 성립하며, 그 범위 밖의 결과를 예측하는 것은 매우 위험할 수 있다는 점이다. C2E2로 주어지는 최적조건에서의 기포성장길이의 추정치는 Table 2의 실험결과에 포함되어 있으며, 그 값은 95% 신뢰구간 내에 포함되어 본 실험이 올바르게 수행되었음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

PFP성형공정에 미치는 여러 인자들의 영향들을 실험계획법을 적용하여 살펴보았다. 주요 인자로는 수지종류, 실린더온도, 공기압, 지연시간, 유지시간 등이며 이 중에서 공기압과 유지시간, 실린더온도의 영향이 큼을 알 수 있었다. 특히 공기압의 영향은 가장 커서 금형의 설계나 작업시 매우 주의하여 고

려하여야 할 것이다. 한편 앞서의 논문에서 수행한 모델링에서는 비록 기포성장길이에 대한 실험결과를 잘 모사하고 기포성장에 관한 유용한 정보를 제공하였지만 기포핵의 생성 이후만을 고려함으로써 PFP성형과정에서 가장 중요하다고 할 수 있는 공기압의 영향을 고려하지 못한 문제를 안고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 실험을 통하여 성형품의 표면불량 문제를 해결하기 위하여는 PFP성형방법의 적용만이 아니라 공기압의 증가, 지연시간 및 유지시간의 적절한 수준 내에서의 설정 등의 조절이 필수적임을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 금형의 설계 및 성형조건의 설정 등에 매우 유용한 자료가 될 것으로 예상되며, 아울러 기포의 생성과 성장에 결정적인 영향을 주는 공기압에 대한 이해, 그리고 기포핵의 생성 및 초기 성장과정에 대한 이해를 돕기 위한 기포성장의 동력학에 대한 연구가 더 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

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. D.-H. Kim and K.H. Ahn, The Korean J. Rheol., vol.8, No.3+4, 207 (1996).
7. "C-MOLD Reference Manual," Advanced CAE Technology Inc., New York, pp.2-12 (1995)
8. H. Aida, private communication (1995).
9. 품질설계를 위한 실험계획법, 품질공학강좌 **4**, 한국공업표준협회 (1991).