

사출성형품의 공정 조건에 따른 내환경응력균열 특성에 관한 연구

최두순¹ · 김홍석[#]

Influence of Molding Conditions on Environmental Stress Cracking Resistance of Injection Molded Part

D. S. Choi, H. S. Kim

(Received January 18, 2011 / Revised February 2, 2011 / Accepted February 8, 2011)

Abstract

Environmental Stress Cracking(ESC) is one of the most common causes of unexpected brittle failure of thermoplastic polymers. The exposure of polymers to liquid chemicals tends to accelerate the crazing process, initiating crazes at stresses that are much lower than the stress causing crazing in air. In this study, ESC of acrylonitrile butadiene styrene(ABS) was investigated as a function of the molding conditions such as injection velocity, packing pressure, and melt temperature. A constant strain was applied to the injection molded specimens through a 1.26% strain jig and a mixture of toluene and isopropyl alcohol was used as the liquid chemical. In order to examine the effects of the molding conditions on ESC, an experimental design method was adopted and it was found that the injection velocity was the dominant factor. In addition, predictions from numerical analyses were compared with the experimental results. It was found that the residual stress in the injection molded part was associated with the environmental stress cracking resistance (ESCR).

Key Words : Environmental Stress Cracking, Injection Molding, Design of Experiments

1. 서 론

금속이나 세라믹 등에 비하여 고분자 재료는 우수한 성형성과 대량생산성을 가지고 있으며 다양한 성분의 조합을 통하여 요구조건에 맞는 물리적·화학적 성질을 부여할 수 있어 공업재료로서의 적용 범위가 지속적으로 증가하고 있다. 그러나, 고분자 재료의 물성은 성형조건이나 보관 및 운송 시의 온도, 시간, 환경 등에 따라 민감한 영향을 받으며, 특히 장시간의 물성 변화는 아직까지도 정확한 예측이 어려워 예상치 못한 파손을 초래하기도 한다[1]. 피로 (fatigue)나 크리프 (creep) 환경 하에서 상대적으로 낮은 응력상태에서 파손이 발

생하는 것은 일반 금속재료와 동일하지만 고분자 재료의 경우 화학용제와 접할 경우 극히 낮은 응력 또는 변형률 상태에서도 균열이 발생할 수 있다. 이러한 환경응력균열 (environmental stress cracking: ESC) 현상은 용제의 흡수 및 침투, 혼합물의 열역학, 공동현상 (cavitation), 부분적인 재료의 항복 현상 등을 포함하는 복잡한 현상으로서 재료나 화학 등 여러 분야의 관심대상이 되어 왔다. 특히, 고분자 재료의 파손 원인 중에 환경응력 균열에 의한 비율이 15~20%에 달하는 것으로 보고되고 있으며[2], 최근 활용 범위가 넓어지고 있는 플라스틱 제품에 치명적인 결함을 유발시킬 수 있기 때문에 내환경응력균열성(environmental stress

1. 인하공업전문대학 기계설계과
교신저자: 대구대학교 기계·자동차공학부,
E-mail: kimkong@daegu.ac.kr

cracking resistance: ESCR)을 향상시키기 위한 연구가 활발히 수행되어 왔다[3, 4].

Moskala 등은 폴리에틸렌테레프탈레이트(poly-ethyleneterephthalate: PET)의 환경응력을 파괴역학 방식으로 분석하였고[5], Hinksman 등은 알카리 용제에 대한 이소불화비닐(PVDF: poly vinylidene fluoride)의 내환경응력균열 특성을 연구하였으며 [6], Al-Saidi 등은 다양한 화학용제에 대한 폴리카보네이트(polycarbonate)의 내환경응력균열 특성을 연구하였다[7]. 또한 Wang 등은 다양한 종류의 수지에 대해서 내환경응력균열 특성시험 시 부여되는 적정 변형률에 대한 연구를 수행한 바 있다[8]. 이러한 고분자 재료 자체의 특성 외에도 내환경응력균열 특성은 성형 온도나 압력 등의 공정조건에도 큰 영향을 받으며 플라스틱 제품의 생산기술 측면에서는 내환경응력균열 특성의 향상을 위한 주요 공정변수의 선정 및 최적화가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 실험계획법(design of experiments: DOE)을 이용하여[9] 사출속도, 보압, 배럴온도의 세 가지 공정조건에 대한 ABS(acrylonitrile butadiene styrene) 수지의 내환경응력균열 특성을 고찰하였으며, 분산분석(analysis of variance: ANOVA)을 통하여 공정조건 최적화를 수행하였다. 또한, 설정된 사출조건에 대한 수치해석을 통하여 내환경응력균열에 주요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 잔류응력의 효과를 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 ABS 수지의 성형조건에 따른 내환경응력균열성을 분석하기 위하여 Fig. 1 과 같은 시험방법을 사용하였다. 다양한 성형조건으로 성형된 시편을 지그에 고정시켜 일정 변형률을 가한 상태로 화학용제에 일정시간 침지시키고, 이것을 꺼낸 후 다시 100°C 의 환경챔버에 일정 시간 동안 넣어두고 이때 발생하는 환경응력균열을 분석하였다. 각 단계별 상세 시험방법은 다음과 같다.

2.1 사출성형

사출성형에서의 다양한 성형조건을 선정하기 위하여 다구찌 실험계획법의 파라미터 설계(parameter design)를 이용하였다. 먼저 일반적인 사출성형 시 중요 공정조건인 사출속도(A), 보압(B), 배럴온도(C)를 제어인자로 선정하였다. 각 인자에 대한 수준은 성형 한계 내에서 Table 1과 같이 3 수준으로

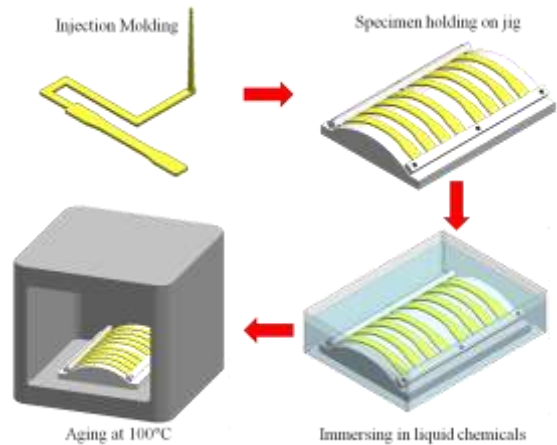


Fig. 1 Experimental procedure for ESCR used in this study

Table 1 Main parameters and levels for D.O.E.

Parameters	Levels			Unit
	1	2	3	
Injection Velocity (A)	15	30	45	mm/s
Packing Pressure (B)	45	60	75	MPa
Barrel Temperature (C)	180	200	220	°C

Table 2 Orthogonal array for Taguchi DOE

Case #	A	B	C	Err.
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

설정하였다. 이때, 사출속도는 사출기의 RAM 속도 기준이며, 체적속도로 환산할 경우 1수준이 18850mm³/s, 2수준이 37700mm³/s, 3수준이 56549 mm³/s 가 된다. 시편의 크기는 Fig. 2에 나타내었고, 이 때 게이트의 두께는 0.9mm이다. 게이트 고화 시간을 실험적으로 확인한 결과 약 1.2초로 나타났고, 따라서 보압시간은 1.5초로 설정하였다. 금형온도와 냉각시간은 각각 40°C, 20초로 모두 동일하게 설정하였다. 제어인자를 배치하기 위한

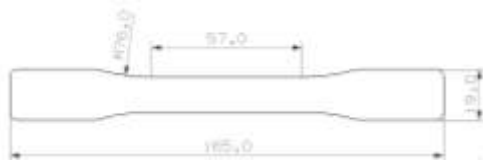


Fig. 2 Dimensions of specimen (thickness = 3.17mm)

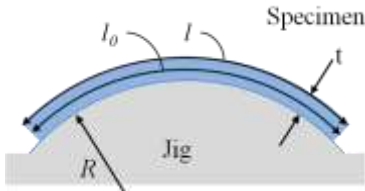


Fig. 3 Schematic diagram of jig and specimen

직교표는 Table 2와 같은 $L_9(3^4)$ 표로 선정하여, 총 9가지 성형조건 하에서 사출성형을 수행하였다. 성형에 사용된 장비는 ENGEL 150ton 직압식 사출기이다. 성형된 시편은 상온에서 24시간 방치한 후 실험에 사용하였다.

2.2 지그 고정

성형된 시편에 일정한 변형률을 발생시키기 위하여 본 연구에서는 시편을 원통 형상을 갖는 지그 표면에 고정시키는 방법을 사용하였다. 지그의 표면은 Fig. 3 과 같이 일정한 곡률반경 R 을 갖는다. 이때 지그 표면에 고정된 시편의 바깥쪽 표면에 발생하는 변형률은 중립면을 기준으로 (1)식과 같이 계산될 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{t}{2R + t} \quad (1)$$

본 연구에 사용된 지그의 표면반지름 R 은 123.5mm 이고 시편의 두께 t 는 3.17mm 이므로 발생하는 변형률은 0.012 이다. 따라서 시편을 지그에 고정시키면 시편 표면에는 1.26%의 변형률이 발생하게 된다.

2.3 화학용제에의 침지

시험에 사용된 화학용제는 톨루엔 (toluene)과 이소프로필알콜 (isopropyl alcohol)을 1:3의 부피비로 혼합한 용제로서, 냉장고와 같은 가전제품의 내환경응력균열성 시험에 많이 사용되는 용제이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 시편을 상온(18°C)에서 지그에 고정시킨 상태로 용제에 일정 시간 침지시

켰다. 이 때 침지시간은 3초와 5초의 두 가지 경우로 나누어 실험하였다.

2.4 에이징

화학용제에서의 침지가 완료된 후 100°C의 환경챔버에서 5분간 에이징(aging) 시켜 균열 발생을 촉진시켰다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 결과

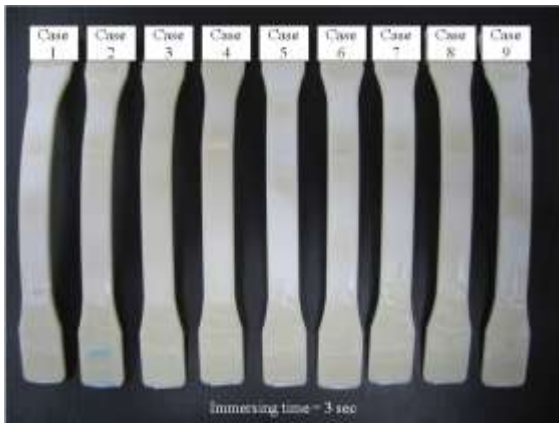
Fig. 4에 내환경응력균열성 시험이 끝난 후의 시편을 나타내었다. 침지시간 3초의 경우 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 시편표면에 백화현상이 나타나며 균열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 모든 시편에서 균열이 관측되었고, 균열의 발생 정도는 시편마다 차이를 보였다. 침지시간 5초의 경우 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 균열이 더욱 성장하여 대부분의 시편에 파단 현상이 관측되었다.

성형 조건에 따른 환경응력균열의 발생 정도를 비교하기 위해 본 연구에서는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 균열의 양태와 전파 범위에 따라 발생된 균열을 4 단계로 구분하였다. 첫번째 단계는 미세한 크레이즈(craze)가 발생한 단계이고, 2 단계는 작은 균열이 발생한 단계, 3 단계는 균열이 시편의 폭 방향으로 완전히 전파된 단계, 4 단계는 시편이 파단된 단계로 구분하였으며, 각 단계에 1~4의 값을 부여하였다.

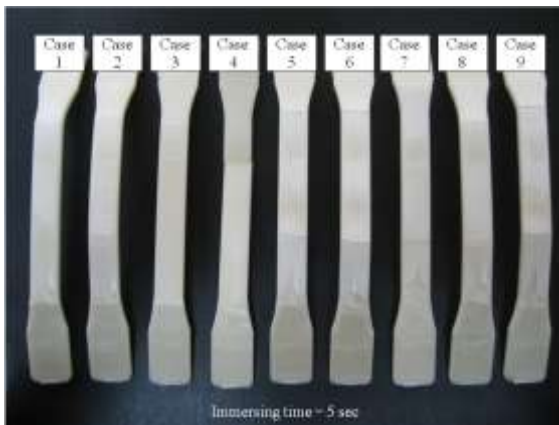
이렇게 정의된 값을 이용하여 Table 2의 각 성형조건 하에서 얻어진 세 개의 시편에 발생한 환경응력균열 정도의 평균값을 Table 3에 나타내었다. 3초 침지의 경우 1에서 3사이의 결과값을 보였고, 5초 침지의 경우에는 2에서 4사이의 값을 보였다. 파라미터 설계를 위한 최적화 목표값은 3초 침지의 결과값과 5초 침지 결과값을 각각 더한 값으로 설정하였다. 이를 이용해 망소특성으로 분산분석(ANOVA)을 수행하였고, 결과를 Table 4에 나타내었다.

분석 결과 환경응력균열에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 사출속도이고, 보압과 배럴온도는 사출속도에 비하여 큰 기여도를 보이지 않는 것으로 분석되었다.

Fig. 6은 신호 대 잡음 비의 분석결과를 나타낸다. 분석결과에서 사출속도가 느릴수록, 환경응력균열 발생이 감소하였고, 보압과 배럴온도는 환경



(a)



(b)

Fig. 4 Specimens of ESCR test with (a) immersing time = 3 sec, and (b) immersing time = 5 sec

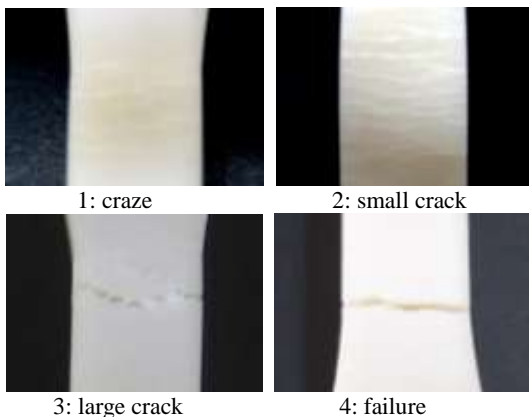


Fig. 5 4-Stages of environmental stress crack and their result value

Table 3 Results of ESCR test

Case #	Immersing time (sec)		Total
	3.0	5.0	
1	1	3	4
2	2	3	5
3	2	2	4
4	3	4	7
5	1	3	4
6	1	4	5
7	3	4	7
8	2	4	6
9	3	4	7

Table 4 Analysis of variance (ANOVA)

Factor	DF	Σx^2	MS	F value
A	2	21.4404	49.5182	7.0027
B	2	3.1661	0.2811	1.0341
C	2	9.4468	17.2035	3.0855
Error	2	3.0617	32.9971	
Total	8	37.1150	100.0000	

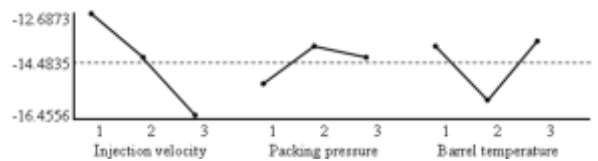


Fig. 6 Signal to noise ratio for environmental stress cracking

응력균열 발생에 뚜렷한 연관성을 보이지 않았다. 최적공정조건은 A₁B₂C₃로 예측되었다.

3.2 결과 분석

전절의 실험결과에서 고찰한 바와 같이 동일한 소재와 용제, 환경조건이라 할지라도 사출조건에 따라 상이한 균열 양상을 보임을 알 수 있었다. 사출성형 시의 공정조건 변화는 용융소재의 유동 및 보압, 냉각 과정에 복합적인 영향을 미치며 결과적으로 성형품 내부에 미세한 차이를 발생시킨다. 본 연구에서는 공정조건 변화에 따른 수치해석 결과를 비교/분석하여 균열 발생에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 분석해 보았다. 수치해석에는 Autodesk 사의 Moldflow MPI 6.1 이 사용되었으며, Fig. 7 에 해석모델을 나타내었다. 분석 결과 성형

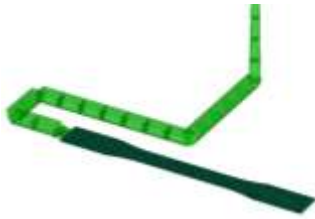


Fig. 7 Finite element model for numerical analysis

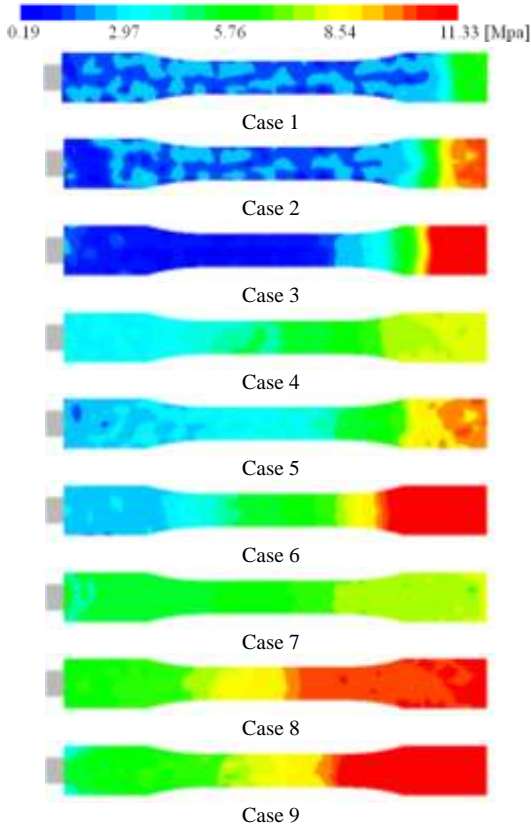


Fig. 8 Residual stress distribution of each case

Table 5 Average residual stress of numerical results

Case #	Average residual stress in the central region (MPa)
1	1.45
2	1.41
3	1.40
4	4.63
5	3.35
6	5.35
7	6.15
8	8.75
9	8.20

Table 6 Analysis of variance (ANOVA)

Factor	DF	Σx^2	MS	F value
A	2	332.1478	95.4955	211.9888
B	2	2.6995	0.3272	0.3272
C	2	9.7603	2.3669	2.3669
Error	2	1.5668	1.8104	1.8104
Total	8	346.1754	100.0000	

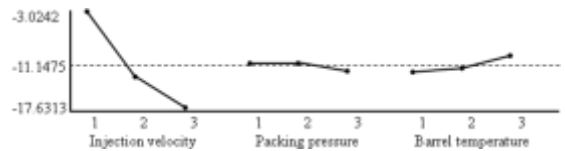


Fig. 9 Signal to noise ratio for average residual stress in the central region

품 표면에 발생하는 잔류응력(residual stress)의 크기가 균열 발생과 가장 큰 연관이 있는 것으로 판단하였다.

Fig. 8에 Table 1, 2에 나타낸 공정조건으로 성형된 시편 표면에서의 잔류응력 분포를 Mises-Hencky 응력값으로 나타내었다. 모든 경우에 잔류응력은 게이트에서 멀어질수록 점차 증가하는 경향을 보였다. 또한, 각 사출조건에서의 잔류응력 분포 특성을 살펴보면, case 1, 2, 3의 경우 시편 끝부분에 높은 응력이 집중되어 있으나, case 8, 9의 경우에는 시편 중심부부터 끝단까지의 넓은 면적에 높은 응력이 분포함을 알 수 있다. 실제로 균열이 발생하는 위치는 지그에 고정되는 시편의 양끝단을 제외한 시편 중심부이기 때문에 균열 발생에 직접적인 영향을 미치는 것은 중심부의 표면 잔류응력이라 해석할 수 있다.

따라서 각 공정조건별로 시편 중심부에서의 평균 잔류응력을 계산하여 이를 Table 5에 나타내고, 이 결과를 이용해 망소특성으로 분산분석(ANOVA)을 수행하여 결과를 Table 6에 나타내었다. 분석 결과 중심부 표면 잔류응력의 크기에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 사출속도이고, 보압과 배럴온도는 거의 기여도가 없는 것으로 분석되었다. Fig. 9는 신호 대 잡음 비의 분석결과를 나타낸다. 분석결과에서 사출속도가 느릴수록 표면 잔류응력 발생이 감소하였고, 보압과 배럴온도는 표면 잔류응력에 거의 연관성을 보이지 않았다. 이러한 결과는 실험에서 분석된 환경응력균열과 사출 공정조건

사이의 관계와 일치한다.

사출성형 시 표면부의 잔류응력은 유동 중의 전단응력과 냉각 시의 수축에 의하여 형성된다. 사출속도의 감소는 유동 중의 전단응력을 감소시켜 이로 인한 잔류응력의 발생을 감소시킬 것이다. 표면부의 냉각으로 인한 잔류응력 크기는 금형온도와 배럴온도에 큰 영향을 받을 것이다. 본 연구에서는 금형온도를 제어인자로 선정하지 않았으므로 이에 대한 영향도를 파악하지 못하였고, 따라서 향후 연구에서는 반드시 금형온도를 제어인자에 포함시켜야 할 것으로 보인다.

수치해석상에서 잔류응력의 정확한 예측은 어려우나, 공정조건에 따른 상대비교는 참고할만한 결과라 판단된다. 따라서 환경응력균열의 발생을 억제시키기 위해서는 성형품 표면 잔류응력의 최소화가 중요하고, 이를 위해서는 사출속도의 감소가 효과적이라는 결론을 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 사출성형의 공정조건이 내환경응력균열성에 미치는 영향을 실험을 통하여 살펴보고, 이러한 현상이 발생하는 원인을 수치해석을 통해 분석하였다. 이러한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 실험계획법을 이용한 내환경응력균열성 실험을 통하여 사출성형의 각 공정조건이 환경응력균열에 미치는 기여도를 분석하였다.

(2) 분산분석을 통하여 공정조건에 영향을 고찰하였고, 사출속도가 낮을수록 환경응력균열의 발생이 억제되는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 수치해석을 통하여 환경응력균열의 발생과 사출성형품 표면의 잔류응력의 크기와 연관이 있음을 확인하였다.

(4) 본 연구에서의 얻어진 사출성형 공정조건과 환경응력균열 발생 사이의 연관관계는 높은 내환경응력균열성이 요구되는 제품의 생산에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2009학년도 인하공업전문대학 교내 연구비지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. Scheirs, 2000, Compositional and Failure Analysis of Polymers, J. Wiley & Sons, Chichester.
- [2] D. Wright, 1996, Environmental Stress Cracking of Plastics, RAPRA Technology Ltd., Shawbury.
- [3] M. C. Hough, D. C. Wright, 1999, Two New Test Methods for Assessing Environmental Stress Cracking of Amorphous Thermoplastics, Polym. Test., Vol. 15, pp. 407~421.
- [4] E. J. Moskala, 1998, A Fracture Mechanics Approach to Environmental Stress Cracking in Poly(ethyleneterephthalate), Polymer, Vol. 39, pp. 675~680.
- [5] P. Hinksman, D. H. Isaac, P. Morrissey, 2000, Environmental stress cracking of poly(vinylidene fluoride) and welds in alkaline solutions, Polym. Degrad. Stab., Vol. 68, pp. 299~305.
- [6] L. F. Al-Saidi, K. Mortensen, K. Almdal, 2003, Environmental Stress Cracking Resistance. Behaviour of Polycarbonate in Different Chemicals by Determination of the Time-Dependence of Stress at Constant Strains, Polym. Degrad. Stab., Vol. 82, pp. 451~461.
- [7] H. T. Wang, B. R. Pan, Q. G. Du, Y. Q. Li, 2003, The Strain in the Test Environmental Stress Cracking of Plastics, Polym. Test, Vol. 22, pp. 125~128.
- [8] G. Menges, W. Michaeli, and P. Mohren, 2001, How to Make Injection Molds.
- [9] W. C. Jung, Y. M. Heo, K. H. Shin, G. S. Yoon, S. H. Chang, M. Y. Kim, 2006, An Experimental Study on Molding Factor for Spiral Type Micro Injection Product, Trans. Mater. Process., Vol. 15, pp. 65~70.