

원통형 플라스틱 성형품의 싱크 마크를 최소화하기 위한 사출성형 조건의 최적화

권윤숙*, 정영득#

Optimization of Injection Molding to Minimize Sink Marks for Cylindrical Geometry

Youn Suk Kwon* and Yeong Deug Jeong#

ABSTRACT

This paper describes the optimization of injection molding conditions to minimize sink marks. Sink marks, which refer to a small depression on the surface opposite a thick wall thickness, are often encountered in injection molded plastic parts. Part geometry, material properties and processing conditions during injection molding can affect the sink mark depth. We designed the runner system which is possible balanced filling to cavities using CAE program Moldflow™ and then obtained optimal processing conditions by Taguchi's Robust Design technique. By actual injection molding using optimized mold and molding conditions, it confirmed that sink mark depth decreased zero compared to 1mm level in the conventional mold and process.

Key Words : Sink marks (싱크 마크), Filling balance (균형충전), Taguchi method (다구찌 방법), Volumetric shrinkage (체적수축), ABS (아크릴로니트릴-부타디엔-스티렌), S/N ratio (신호대 잡음 비)

1. 서론

일반 플라스틱 재료에 대한 사출 성형공정, 성형품의 잔류응력, 수축 및 성형품의 품질에 관한 연구는 활발히 진행되어 오고 있다.¹ 그 중 성형품 질에 관한 것으로서 성형품의 두께가 상대적으로 두꺼운 부위는 게이트의 고화 후에도 계속 수축하는 경우와 금형설계상 스프루, 러너 및 게이트의 크기와 위치가 적절하지 않아 두꺼운 부위까지 보압을 전달하지 못하게 되는 경우에 체적수축

(Volumetric shrinkage)의 차이로 인한 싱크마크(sink marks)가 종종 발생한다.^{2,3} 사출성형에 있어서 금형의 캐비티 말단까지 수지가 유입되는지, 즉 완전충전이 가능한 지가 중요하며 완전충전이 되더라도 용융수지가 게이트에서 제품의 끝단까지 흘러들어갈 때 각 캐비티 사이에 동시충전이 중요하다.⁴

본 논문에서의 원통형 4캐비티의 러너시스템에서 일어나고 있는 충전 불균형에 의해 발생하는 싱크마크의 최소화를 하기 위한 사출성형 조건의 최적화를 모색하고자 한다. 일반적으로 다수캐비티

접수일: 2007년 10월 19일; 게재승인일: 2008년 3월 28일
* 부경대학교 대학원
교신저자: 부경대학교 기계공학부
E-mail: ydjung@pknu.ac.kr Tel. (051) 621-1534

금형에서 충전불균형에 의한 싱크마크의 최소화를 위해서는 금형제작자와 성형 기술자의 경험과 직관에 의해 해결하는 시행착오법에 의존하고 있다. 시뮬레이션도구를 이용하여 실제의 금형을 제작하기 전에 그 결과를 예측할 수 있으며, 사출성형 조건을 변화시키면서 성형품의 상태를 알 수 있어 최적조건의 도출에도 활용 할 수 있다.

본 연구에서는 사출성형 시뮬레이션 도구를 사용하여 각 캐비티 간의 균형충전이 가능한 금형과 최적 사출성형 조건으로 실제 시험사출을 행한 결과 싱크 마크의 깊이는 기존의 금형과 공정에서는 1mm수준 이었던 것을 제로 수준으로 개선되었음을 확인 할 수 있었다.

2. 성형품의 형상 및 특징

본 연구의 대상 성형품은 Fig. 1과 같은 정수기의 필터 제품으로 정밀 사출성형공정을 통하여 제조되며 두께는 3mm, 직경17, 길이는 260mm인 긴 원통 구조를 가지고 있으며, 정수되어진 물이 빠져나올 수 있도록 원통 면에 직경3.5 구멍이 14개있는 것이 특징이다. 파이프의 수지는 내화학, 약품성, 내유성이 뛰어나고 또한 가공적응성이 좋은 ABS 수지로 하였다. 4개의 캐비티로 구성되어 있으며 안쪽 2개(a, a') 캐비티의 게이트와 러너의 크기와 바깥쪽 2개(b, b') 캐비티의 게이트와 러너의 크기가 다름을 알 수 있다. 게이트는 각각 2개씩 안쪽은 직경0.8, 바깥쪽 직경0.9, 스프루와 러너의 크기를 직경4x100mm, 직경7x130mm 이를 사출성형 하는데 있어서 기존의 공정에서는 Fig. 2에서 같이 싱크 마크가 눈에 띄게 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 러너와 게이트는 대칭적인 형상의 동시충전이 가능하게 하기위하여 기존의 게이트와 러너의 형상에서 성형 해석용 모델링을 이용하여 우선 시뮬레이션 하였다. 해석한 결과 Fig. 1에서 나타나는 것과 같은 유동 충전 패턴과 Fig. 2에서 보이는 것과 같은 싱크의 형상이 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 2에서 나타나는 것과 같이 상대적으로 체적 수축이 많이 일어나는 성형품 외관에서 함몰 현상인 체적 수축의 하나인 싱크마크를 줄일 수 있는 방안으로 우선 각 캐비티간 성형품의 균형있는 충전이 중요하다. 이것을 해결하기위해 게이트의 형상과 크기를 Fig. 4와 같이 안쪽과 바깥쪽 게이트를 직경1로 수정하여 각각의 캐비티에 1개씩 위치시

켰으며 러너의 형상도 유동의 균형 충전을 위하여 바깥쪽에만 위치하도록 하여, 사출성형 해석 프로그램인 Moldflow를 사용하여 시뮬레이션하고 제품의 싱크마크에 영향을 미치는 인자를 선정하였다. 시뮬레이션도구를 이용하면 실제로 금형을 제작하기 전에 그 결과를 예측할 수 있으며, 사출성형 조건을 변화시키면서 성형품의 상태를 알 수 있어 최적조건의 도출에도 활용 할 수 있다.

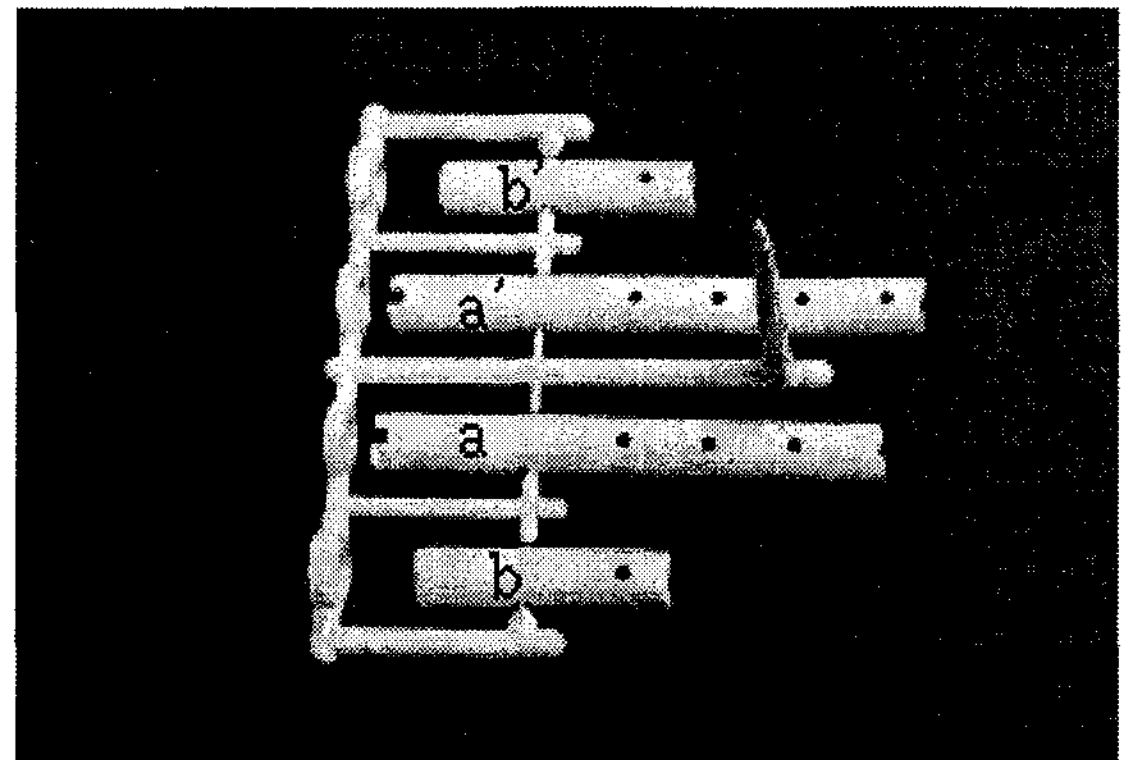


Fig. 1 Injection molded parts with runner system

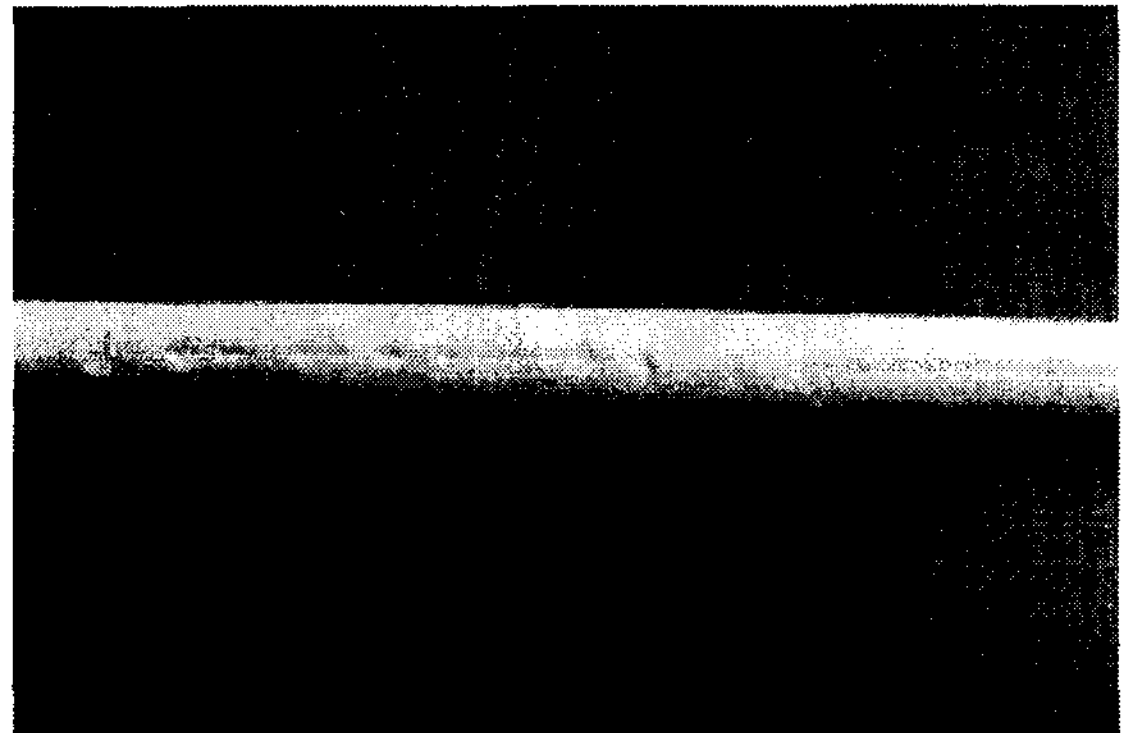


Fig. 2 Detailed sink marks

3. 성형해석 및 공정의 최적화

3.1 사출 성형공정 해석

본 연구는 Fig. 3과 같은 형상에서 기존의 공정에서는 발생하는 싱크마크의 문제를 해결하기 위한 것이다. 우선 동시충전이 가능한 러너 시스템을 설계하기 위해 Moldflow[®]의 퓨전(fusion) 해석을 통해 Fig. 4와 같은 러너시스템으로 설계하였다. Fig. 3과

같은 러너지시스템에서 유동해석을 행한 결과 유동선단이 제품의 내측 게이트를 통해 외측 제품으로 먼저 흘러들어감으로서 각 캐비티 간의 충전이 불균형이 발생하였으며, Fig. 4와 같은 개선된 러너지시스템으로 유동해석을 행한 결과 기하학적으로 균형을 갖춘 러너지시스템으로 인해 각 캐비티 간에 거의 균형충전이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 게이트의 개수가 적어짐에 따른 압력강하의 값은 Table 1에 나타내었다.

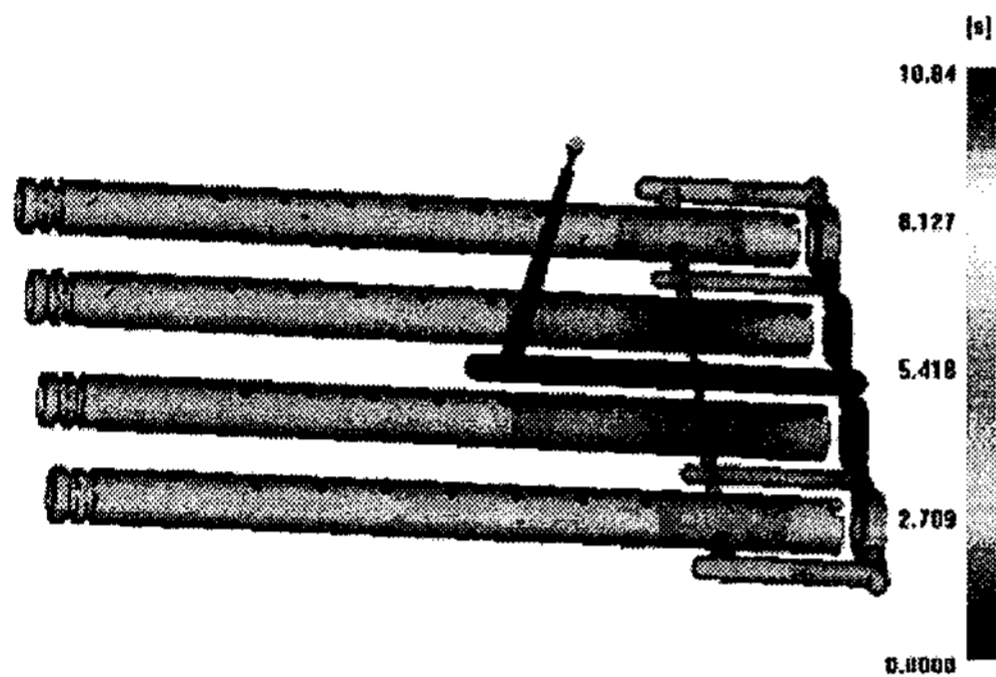


Fig. 3 Injection moldings with conventional runner system

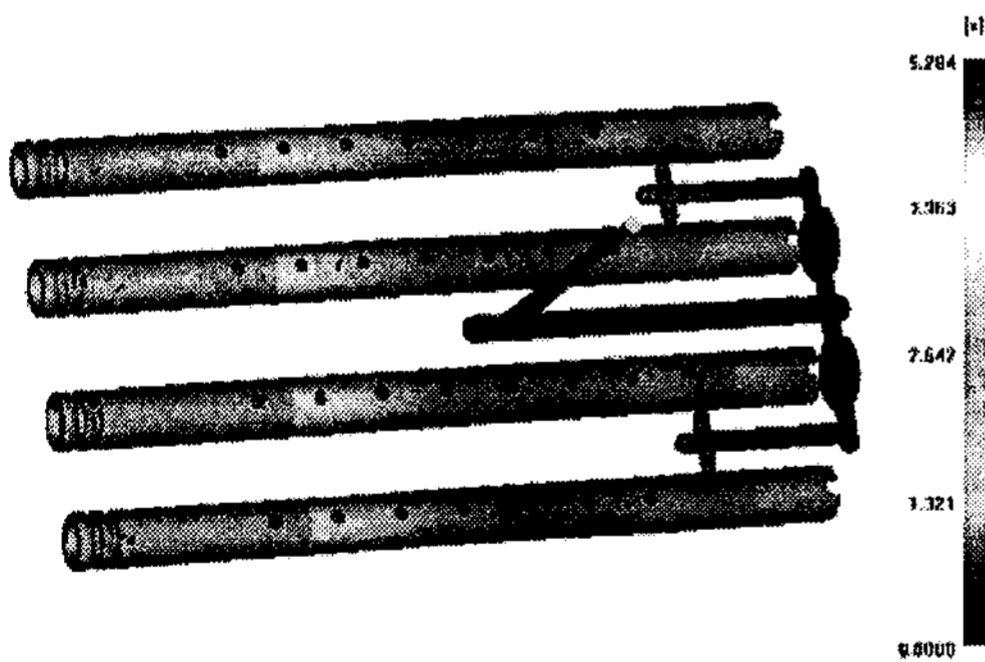


Fig. 4 Injection moldings with modification runner system

Table 1 Comparative pressure at end fill

| Process | Unit | Value |
|--------------|------|-----------|
| conventional | MPa | 0 ~ 42.01 |
| improved | MPa | 0 ~ 40.17 |

3.2 실험계획법을 이용한 사출성형 공정 최적화

본 연구에서는 주어진 조건을 최적화 하기위해

다구찌 실험계획법을 사용하였다.⁵ 공정 또는 제품에 대한 파라미터설계 목적은 잡음 영향 하에서도 성능특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 근접하도록 하는 설계변수의 조건을 찾는 것이다. 직교표를 이용한 파라미터설계에서는 설계변수의 한 조합(직교표의 한 행)에서 여러 개의 특성치를 얻는다. 즉, 한 실험에서 성능특성치를 반복해서 얻는 방법이다. 이 실험에서는 잡음의 인자를 고려하지 않았다. 각 인자에 대한 수준(level)은 Table 2에서와 같은 재료의 물성치를 바탕으로 요구되는 성형범위 한계 내에서 각각 3수준으로 정하였으며, 성형품의 품질 특성치에는 치수, 강도 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 싱크 지수(sink index)를 다구찌 실험의 데이터로 사용하였다. 싱크 지수에 영향을 미치는 성형조건은 Table 3에서와 같이 사출시간, 보압, 보압시간, 용융 수지온도, 금형온도, 냉각시간 등을 요인으로 하였으며 이를 3수준으로 선정하였다. 이를 배치하기 위한 직교표는 $L_{27}(3^6)$ 표로 선정하여 성형조건을 할당하였다. $L_{27}(3^6)$ 직교표에서는 각 인자간의 교호작용이 없는 것으로 가정 하였다.

Table 2 Material properties of ABS

| Properties | Unit | Value |
|----------------------|-------------------|--------|
| Conductivity | W/m/degC | 0.15 |
| Specific Heat | J/kg/degC | 1968 |
| Melt Density | g/cm ³ | 0.9283 |
| Ejection Temperature | deg.C | 89 |

Table 3 Control factors and level

| Control factors | | Level | | |
|----------------------|-----|-------|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Injection time (A) | sec | 8 | 10 | 12 |
| Packing (B) | % | 70 | 80 | 90 |
| Packing time (C) | sec | 6 | 8 | 10 |
| Melt temperature (D) | ℃ | 230 | 240 | 250 |
| Mold temperature (E) | ℃ | 55 | 60 | 65 |
| Cooling time (F) | sec | 15 | 20 | 25 |

$$SN_i = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad (1)$$

품질특성치가 싱크마크 이므로 망소특성에 해당되며 SN비는 식(1)에 의해서 계산된다.^{6,8} 단, y_{ij} 는 설계변수 행렬의 i 번째 실험점에서 관측된 j 번째 특성치이고, n 은 한 실험 점에서의 y 의 반복수이다. 식(1)의 $(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2)$ 은 i 번째 실험점에서 $E(y^2)$ 의 추정이라고 볼 수 있으며, SN_i 는 이것을 로그로 변환시킨 다음 (-10)을 곱한 것이므로 SN_i 를 크게 하는 설계조건을 찾는다는 것은 기대비용을 적게 하는 조건을 찾는 것과 대등하다고 할 수 있다. 예를 들어, 직교표 10행의 SN비 계산은 다음과 같다.

$$SN_{10} = -10 \log \left\{ \frac{1}{7} (2.456^2 + \dots + 0.9754^2) \right\}$$

$$= -6.505$$

해석을 통한 결과 값인 싱크 지수로 제품의 7곳을 선정하여 품질의 특성치(y_i)로 정하였으며, 이를 SN비로 구한 값을 나타내었다. SN비를 가지고 성형용 파이프에 가장 영향을 미치는 각각의 요인별 수준을 찾아낸 후 분산분석(ANOVA)을 하여 가장 영향을 많이 미치는 요인을 찾아 이를 제어하고자 한다.

4. 결과 분석 및 최적 공정조건 결정

각 실험에서의 SN비에 대한 수준별 평균값과 기여량을 구한 결과는 Table 4와 같으며, 이에 대한 요인 효과도는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 싱크지수가 적은 최적 공정은 $A_3, B_3, C_3, D_1, E_1, F_3$ 임을 알 수 있다. 요인 효과도에서 보는 바와 같이 금형의 온도(E)는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 오차항에 풀링(pooling)한 후 Table. 4와 같이 분산분석을 얻을 수 있다. 분산분석표에서 제어인자의 기여율을 고려하여 보면 보압시간(C)이 가장 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 금형온도는(E) 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

SN비에 유의한 영향을 주는 제어인자의 최적수준은 SN비를 최대화 하는 수준이다. 따라서 파이프의 사출성형에 관한 최적 공정 조건은 Fig. 5와

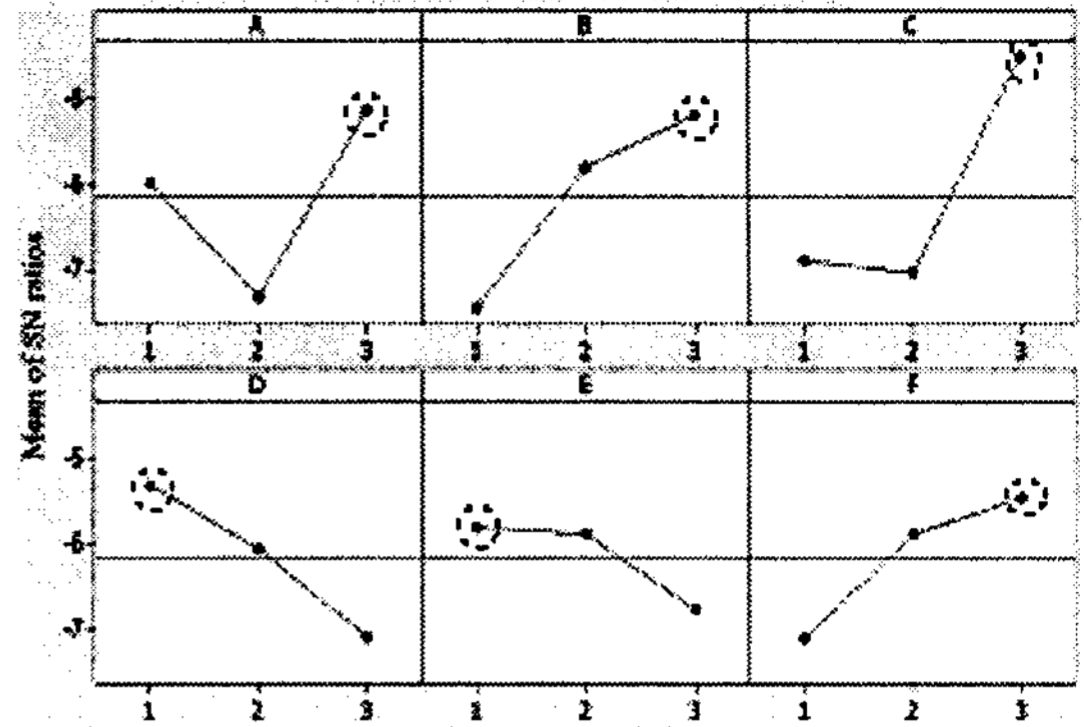


Fig. 5 Plot of main effects of SN ratio

Table 4 Analysis of variance of SN Ratio

| | DF | SS | MS | F | P |
|-------|----|--------|--------|------|-------|
| A | 2 | 21.777 | 10.889 | 2.02 | 0.165 |
| B | 2 | 24.483 | 12.241 | 2.27 | 0.135 |
| C | 2 | 36.825 | 18.413 | 3.42 | 0.058 |
| D | 2 | 14.397 | 7.198 | 1.34 | 0.291 |
| F | 2 | 13.091 | 6.545 | 1.21 | 0.323 |
| error | 16 | 86.245 | 5.390 | | |
| Total | 26 | 196.88 | | | |

Table 4로 부터 A_3, B_3, C_3, D_1, F_3 임을 알 수 있다. 이 최적조건에서의 SN비에 대한 예측값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\widehat{SN} = \hat{\mu} + \hat{a}_3 + \hat{b}_3 + \hat{c}_3 + \hat{d}_1 + \hat{f}_3$$

$$= -0.990961$$

최종적인 파이프의 사출공정의 작업표준 조건인 $A_1, B_3, C_3, D_1, E_1, F_3$ 에서 확인실험을 행할 필요가 있다. 확인 시뮬레이션을 행한 결과를 얻을 수 있었으며, 이 공정에서 가정 적은 싱크 지수를 얻을 수 있었다.

다구찌 실험계획법을 적용하여 시뮬레이션 한 후 시험사출을 한 결과 싱크 마크를 최소화 하기 위해서는 낮은 압력으로 서서히 사출 하고, 보압시간은 10초, 보압은 사출 압력의 90%로 하고 냉각시간은 25초로 하는 것이 싱크 마크를 줄이는 것임을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 Fig. 6의 시사출을 행한 결과 Fig. 6과 Table. 5에서 보는 것과 같이 유동

의 균형 충전과 싱크 마크를 최소화 할 수 있다.

Table 5에 나타난 치수들은 수축의 측정을 위하여 제작한 깊이 측정기(depth gauge)로 측정하였으며, 정밀도는 1/100 이다.

Table 5 Comparative sink marks index

| Process | Unit | Value |
|--------------|------|-------|
| conventional | mm | 1.40 |
| improved | mm | 0.00 |

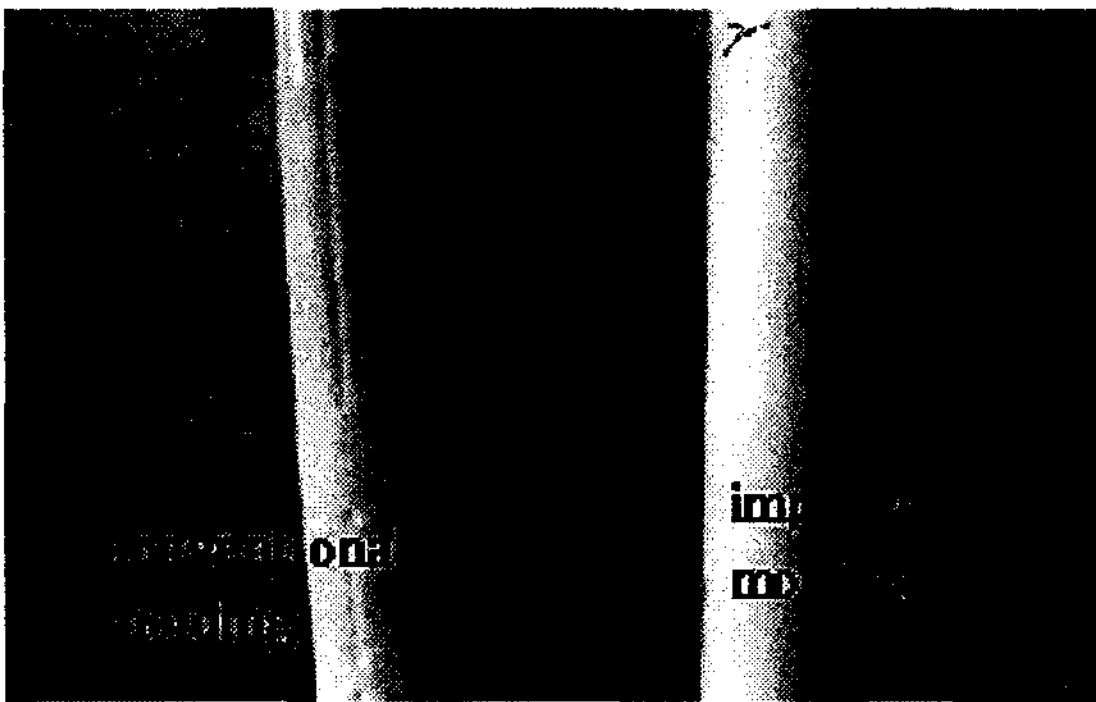


Fig. 6 Final products under optimum process parameters

5. 결론

본 연구에서는 4캐비티 금형에서 성형할 수 있는 긴 원통형 성형품을 대상으로 균형충전이 가능한 러너시스템을 설계한 후, 다구찌 실험계획법으로 최적의 사출성형 조건을 구한 후, 이를 실제 사출성형 실험을 행한 결과 싱크마크를 없애는 방법으로 중요한 결과는 다음과 같다.

(1) 유동의 균형 충전을 위한 기존의 게이트의 형상과 치수에서 수정 게이트와 크기를 이용 하여 유동의 균형 충전을 알아 볼 수 있었으며, 이는 기존의 공정보다 균형 충전을 보임을 알 수 있었다.

(2) 위의 결과를 가지고 다구찌 실험 계획법을 이용하여 유의한 인자를 찾아 이를 분산분석 하여 영향을 미치는 인자는 사출시간(A₃), 보압 (B₃), 보압시간 (C₃), 수지온도(D₁), 금형온도 (E₁), 냉각시간 (F₃) 임을 알 수 있었다.

(3) (2)의 결과를 확인 실험을 행한 결과 가장 적은 싱크 지수를 나타내는 것을 알 수 있었으며 이를 가지고 공정에 적용하여 그 실제 제품을 사출

하였다.

(4) 이러한 결과로 센트럴 파이프의 사출 성형 조건에서는 낮은 압력으로 서서히 사출 하고, 보압 시간은 10초, 보압은 사출 압력의 90%로 하고 냉각 시간은 25초로 하는 것이 싱크 마크를 줄이는 것임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Kwon, Y. S., "A study on the optimization of injection molding process using experiment of design," M.S Thesis Pukyong National University, pp. 9-10, 2002.
2. Jeong, Y. D. and Gu, B. H., "Design products and mold," Intervision, pp. 250-252, 2005.
3. Chang, R. Y. and Tsaor, B. D., "Experimental and Theoretical Studies of Shrinkage, Warpage, and Sink Marks of Crystalline Polymer Injection Molded Parts," Journal of Polymer Engineering and Science, Vol. 35, No. 15, pp. 1222-1230, 1995.
4. Alam, K. and Kamal, M. R., "A robust optimization of injection molding runner balancing," Journal of Computer and Chemical Engineering, Vol. 29, Issue 9, pp. 1934-1944, 2005.
5. Yum, B. J., "Design and Analysis of Experiments," KAIST IE LAB, pp. 182-183, 2007.
6. Nontgomery, D. C., "Design and Analysis of Experiments," John Wiley & Sons, pp. 218-246, 2001.
7. Lee, S. H., "Engineering statistics data analysis by using Minitab," Eretec Inc., pp. 727-775, 2006.
8. Park, S. H., "Design and Analysis of Experiments," Minyoungsa, p. 423, 2002.