

휴대폰 후면 커버의 공정시간 단축에 따른 치수 편차의 최적화에 관한 연구

김주권^{*,**}, 김종선^{***}, 이준한^{***}, 객재섭^{*,#}

*부경대학교 기계공학과, **LG전자 생산기술원, ***한국생산기술연구원 금형기술그룹

A Study on the Optimization of the Dimensional Deviation due to the Shortening of the Cycle Time for Rear Cover of Mobile Phone

Joo-Kwon Kim^{*,**}, Jong-Sun Kim^{***}, Jun-Han Lee^{***}, Jae-Seob Kwak^{*,#}

^{*}Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, ^{**}PRI, LG Electronics Inc.,
^{***}Molds and Dies Technology Group, Korea Institute of Industrial Technology.

(Received 26 September 2017; received in revised form 13 October 2017; accepted 22 November 2017)

ABSTRACT

In this study, we investigated the optimization of process conditions by using the Six Sigma process, design of experiment (DOE) method and response surface method (RSM) to resolve dimensional deviation and appearance problems arising from the shortened process time of the mobile phone rear cover. The analysis of the trivial many was performed by 2-sample T-test and cooling time, and mold temperature and packing pressure were selected as the vital fews affecting the overall width of the product. The optimal conditions of the process were then studied using the DOE and the RSM. We analyzed the improvement effects by applying the selected optimal conditions to the production process and the results showed that the difference between the mean value and target value of the overall width stood at 0.01 mm, an improvement of 88.89% compared to current process that fell within the range of standard dimension. The short-term process capability stood at 4.77σ , which implied an excellent technology level despite a decrease by 0.22σ compared to the current process. The difference in process capability decreased by 2.44σ to 0.41σ , showing a significant improvement in management capability. Ultimately, the process time of the product was shortened from 18.3 seconds in the current process to 13.65 seconds, resulting in a 34.07% improvement in production yield.

Key Words : Injection Molding(사출성형), Cycle Time(주기 시간), Optimization(최적화), Six Sigma(6시그마), Design of Experiment(실험계획법), Response Surface Method(반응표면법)

1. 서 론

플라스틱 사출성형은 비교적 짧은 공정시간을 가지며 이로 인해 높은 생산성을 얻을 수 있는 공정

이다. 또한 양호한 표면 상태 등의 좋은 제품 품질을 얻을 수 있으며 경량화와 기계적 성질 측면에서도 매우 우수한 공정이다. 그러나 사출성형 공정은 플라스틱 원재료를 높은 온도에서 녹여 성형하는 방법으로 성형 후 충분한 냉각과정을 거쳐야 한다. 따라서 제품의 공정시간 중 냉각시간이 차지하는 비율이 매우 크며 냉각시간의 설정에 따라 제품의

Corresponding Author : jskwak5@pknu.ac.kr
Tel: 051-629-6139, Fax: 051-629-6126

생산성이 좌우된다. 이에 따라 제품의 냉각시간을 예측하여 설계 단계부터 반영시키는 것이 중요하게 여겨지고 있으며 공학적, 수학적으로 냉각시간을 예측하는 연구들이 이루어져 왔다.^{[1]-[4]}

또한 사출성형의 공정 단계에서 제품의 생산성을 향상시키기 위해 냉각시간을 단축하여 전체 공정시간을 줄이기 위한 연구들이 진행되어 왔다. 단순히 냉각시간을 짧게 설정하여 공정시간을 단축시키면 제품의 무게나 외관 품질에 좋지 않은 결과를 야기할 수 있기 때문에 냉각시간을 단축시키면서 제품의 품질을 유지, 혹은 개선하기 위한 공정 조건 최적화가 6 시그마, 실험계획법과 같은 공학적, 통계적 도구를 사용하여 진행되고 있다.^{[5]-[6]}

본 논문에서는 휴대폰 후면 커버의 냉각시간을 단축하여 공정시간을 줄이면서 이에 따른 치수 편차 및 외관 문제를 해결하고자 6 시그마 프로세스와 실험계획법, 반응표면분석법으로 공정 조건의 최적화를 연구하였다. 기존에 생산되고 있는 휴대폰 후면 커버의 냉각 시간과 제품의 치수와 외관 상태에 대한 현 공정능력을 분석하고 제품의 치수에 영향을 미치는 인자들을 선별하여 냉각시간을 줄임과 동시에 최적화를 진행하였다. 선별된 인자들은 2-샘플 T 검정을 통해 가인자 분석을 진행하여 영향도를 평가하고 실험계획법과 반응표면분석법을 이용하여 최적조건을 도출하였다. 도출된 최적 조건을 실제 공정 조건에 반영하고 치수 안정성, 외관 품질, 그리고 공정능력을 평가하여 공정시간 단축에 따른 제품 품질 안정성에 대해 분석하였다. 최종적으로 본 연구에서는 제품의 공정시간을 단축시켜 생산수율을 향상시키고, 동시에 제품의 품질을 기존 공정과 비교하여 동일하거나 더 좋게 개선시키는 것을 목표로 진행하였다.

2. 실험

2.1 재료

본 논문의 대상 제품은 휴대폰(mobile phone)의 후면 커버(rear cover)로 Fig.1에 나타나있으며 사출성형 공정으로 생산된다. 제품의 치수는 107.64 mm x 63.16 mm이며 수지는 LG화학의 PC(SC1004A)를



Fig. 1 Schematics of rear cover used in the study

사용하였다. 제품 생산에 사용된 사출성형기는 화낙社의 180톤 사출성형기 S-2000i150B이다.

2.2 공정시간 단축 시 문제점 파악

현재 생산되고 있는 휴대폰 후면 커버와 관련된 제품들의 공정시간(cycle time)을 평가한 결과, 총 12개 파트에 대한 공정시간의 평균값은 19.5초이었으며 사출공정 순서에 따른 시간 점유율을 분석하였을 때 냉각시간이 9.42초로 총 공정시간 19.5초의 49%를 점유하고 있는 인자로 나타났다. 휴대폰 후면 커버의 생산수율을 향상시키기 위해 공정시간을 현 19.5초에서 13초로 단축시켜 제품을 생산한 결과, 제품의 치수와 외관에 문제가 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 공정시간이 13초일 때 제품의 전장 치수는 63.26 ± 0.12 mm로 생산 제품의 기준 전장 치수인 63.16 ± 0.1 mm과 0.10 mm 정도 편차가 발생하였으며 전장 치수 분포가 규격 상한으로 쏠리는 것을 확인하였다.

따라서 생산 제품의 전장 치수를 기준 치수 63.16 ± 0.1 mm로 이동시킬 필요가 있다. 또한 제품의 공정시간을 13초로 단축시켰을 때, 외관에 웰드라인(weld line)이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 휴대폰 후면 커버의 생산수율을 높이기 위해 공정시간을 줄이는 한 편, 제품의 치수와 외관에 불량 이 발생하지 않도록 영향 인자들의 최적화가 동시에 진행되어야 한다.

또한 제품의 생산수율 높이기 위해 단순히 공정시간을 단축시키는 방법으로는 제품의 양산 기준을 맞추기가 어렵다. 그러므로 기존 공정 조건에서 공정시간 외에 제품의 치수나 외관에 영향을 주는 인자들을 탐색하여 상호 간의 최적화 연구가 필요하다. 최종적으로 제품의 공정시간을 단축시키면서

기존 생산공정의 제품 품질을 저하시키지 않는 조건을 찾아야 한다.

2.3 현 공정상태 분석

현재 생산되는 휴대폰 후면 커버의 공정능력을 분석하기 위해 60개 샘플을 생산하여 전장 치수를 측정하여 다음 공정분석을 진행하였다. 생산된 60개 샘플의 전장 치수는 63.23 ± 0.03 mm며 기준 전장 치수 63.16 ± 0.1 mm와 0.07 mm의 편차를 나타내었다.

생산된 샘플의 전장 치수를 바탕으로 제품의 생산 공정능력을 분석하였으며 장기공정능력 Z_{lt} 와 단기공정능력 Z_{st} , 그리고 이 두 지표의 차이인 Z_{shift} 로 분류하여 평가하였다. 장기공정능력은 공정이 장기간에 걸쳐서 공정의 균간 변동이 충분히 반영된 변동을 의미한다. 단기공정능력은 공정의 각종 변동 요인이 없다고 가정한 이상적인 공정능력으로 균내 변동만을 가정하여 값이 높을수록 공정의 기술력이 우수하다는 것을 의미한다. 두 지표의 차이는 Z_{shit} 는 공정의 관리 상태를 나타내는 지수를 의미하며 값이 낮을수록 공정의 관리력이 우수하다는 것을 나타낸다. 현 공정 상태에서 Z_{lt} 는 2.23σ , Z_{st} 는 7.62σ , Z_{shift} 는 5.39σ 로 기술력은 우수하나 관리력은 부족한 상태이다. 따라서 제품의 치수 편차에 영향을 주는 원인들을 고찰하여 평균치 이동과 산포 개선을 통해 공정능력을 개선하면서 동시에 공정시간을 단축시킬 필요성이 있다.

2.4 영향인자 선정 및 분석

휴대폰 후면 커버의 공정시간을 단축시켰을 때 발생하는 전장 치수 불량과 외관 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 실험계획법(design of experiment)과 반응표면분석법(response surface methodology)을 사용하여 최적화를 진행하였다. 실험계획법과 반응표면분석법은 제품의 전장 치수에 영향을 미치는 영향인자를 선별하고 치명인자를 선택하여 진행하였다. 휴대폰 후면 커버의 전장 치수에 영향을 미치는 인자를 판별하기 위해 프로세스 맵핑(process mapping)과 특성 요인도(fish bone diagram)를 사용하였으며 제어 가능한 인자들과 제어 불가능한 인자들을 구분하여 이를 기반으로 사출성형

관련 전문가 집단을 대상으로 중요도 평가를 진행하였다. 평가비용은 직접 인자에 대해서는 1점, 간접 인자에 대해서는 0.5점으로 중요도에 따른 가중치를 달리하여 평가하였고 7점 이상을 받은 사출속도, 사출압력, 보압, 보압시간, 냉각시간, 금형온도에 대해 가인자 분석을 실시하였다. 게이트 수와 게이트 지름도 설문 결과에서 7점 이상을 기록하였으나 금형과 제품 형상을 수정해야하는 부분으로 본 연구에서는 가인자 분석에서 제외하였다. 먼저 금형온도에 따른 치수 편차의 변화량을 분석하였다. 분석은 2-표본 T 검정으로 금형온도가 80°C, 100°C일 때 치수 편차의 변화량을 확인하였다.

분석 결과, 금형온도가 110°C일 때 전장 치수는 63.12 ± 0.01 mm, 금형온도가 80°C일 때는 전장 치수가 63.14 ± 0.01 mm로 측정되었으며 P-값은 0.000로 분석되었다. 따라서 P-값이 0.05보다 작으므로 금형온도에 따라 제품의 치수 편차에 차이가 있다는 것을 알 수 있으며 금형온도를 치명인자로 선택하였다. Fig. 2는 금형온도에 따른 제품의 전장 치수 변화량에 대한 상자 다이어그램(box diagram)을 나타냈다. Fig. 3은 냉각시간에 따른 제품 전장 치수 변화량에 대한 상자 다이어그램을 나타내었다. 분석은 냉각시간이 7초와 9초일 때 2-표본 T 검정을 진행하였으며 각각 전장치수가 63.14 ± 0.01 mm, 63.15 ± 0.01 mm로 측정되었고 P-값은 0.003으로 0.05보다 작게 분석되었다. 따라서 냉각시간은 제품전장 치수에 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며 치명인자로 선정하였다.

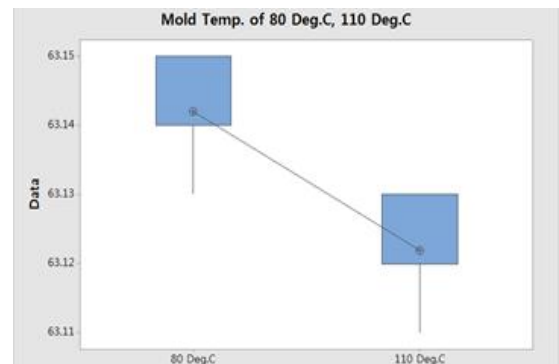


Fig. 2 Box diagram for dimensional changes according to mold temperature

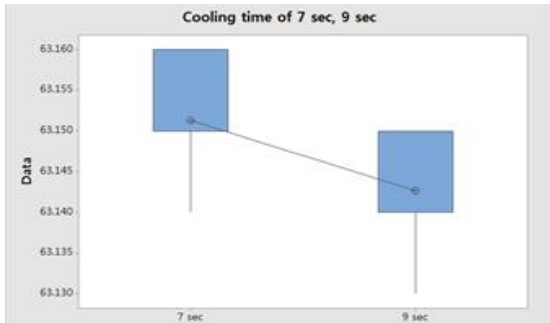


Fig. 3 Box diagram for dimensional changes according to cooling time

사출압력의 경우, 전장 치수의 변화량에 미치는 영향을 2700 kgf/cm^2 , 2800 kgf/cm^2 일 때 2-표본 T검정을 진행하였으나 각각 전장 치수가 $63.16 \pm 0.02 \text{ mm}$, $63.16 \pm 0.01 \text{ mm}$ 로 측정되었으며 P-값이 0.445로 0.05보다 매우 큰 값이 관측되었다. 따라서 사출압력의 경우 전장 치수 변화에 영향을 미치지 않는다는 결론을 얻었으며 치명인자에서 제외하였다. Fig. 4는 사출압력에 따른 전장 치수 변화에 대한 상자 다이어그램을 나타내었다.

사출속도에 따른 치수 편차의 변화량도 2-표본 T검정 방법으로 사출속도가 120 mm/s, 160 mm/s인 경우를 분석하였으며 각각 전장 치수가 $63.13 \pm 0.21 \text{ mm}$, $63.13 \pm 0.20 \text{ mm}$ 로 측정되었다. P-값은 0.653으로 분석되었고 P-값이 0.05보다 크므로 사출속도에 따라 전장 치수가 차이가 없다는 것을 알 수 있으며 치명인자에서 제외하였다.

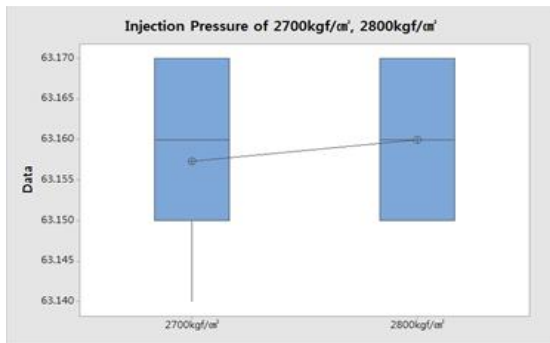


Fig. 4 Box diagram for dimensional changes according to injection pressure

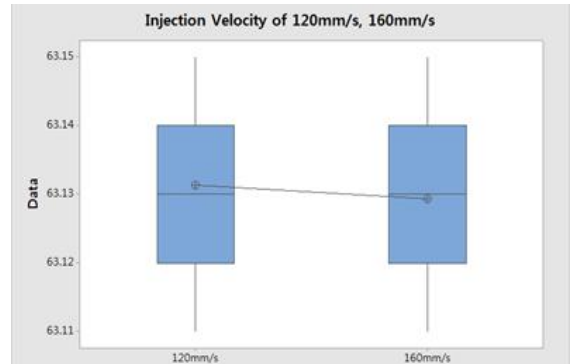


Fig. 5 Box diagram for dimensional changes according to injection speed

Fig. 5는 사출속도에 따른 전장 치수 변화에 대한 상자 다이어그램을 나타내었다. Fig. 6은 보압시간에 따른 제품의 전장 치수 변화에 대한 상자 다이어그램을 나타내었다. 보압시간에 따른 전장 치수 변화량의 관계를 알아보기 위해 보압시간을 0.8 초, 1.2초로 하여 2-표본 T 검정을 진행하였다. 검증 결과, 보압시간이 0.8초인 경우 전장 치수가 $63.13 \pm 0.02 \text{ mm}$, 보압시간이 1.2초인 경우 전장 치수가 $63.13 \pm 0.01 \text{ mm}$ 로 측정되었으며 P-값은 0.083으로 분석되었다. P-값이 0.05보다 크므로 보압시간에 따른 제품의 전장 치수 변화가 없다는 것을 알 수 있으며 치명인자에서 제외하였다.

보압에 따른 제품의 전장 치수 변화량을 분석하기 위해 보압이 120 MPa, 160 MPa일 때 2-검증 T검정 분석을 실시하였다. 분석 결과 보압이 120MPa

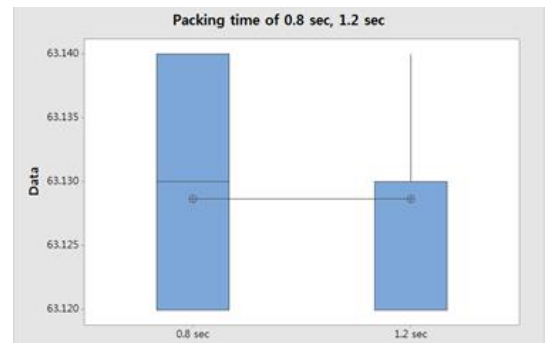


Fig. 6 Box diagram for dimensional changes according to packing time

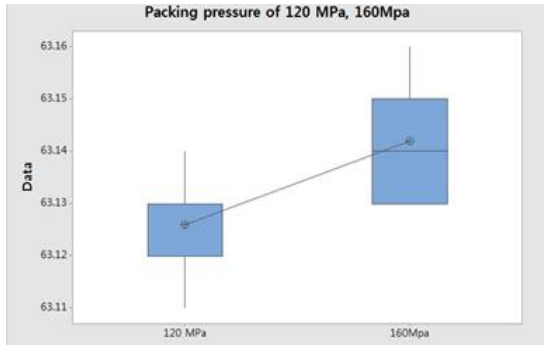


Fig. 7 Box diagram for dimensional changes according to packing pressure

일 때는 전장 치수가 63.13 ± 0.02 mm, 보압이 160 MPa 일 때는 전장 치수가 63.14 ± 0.02 mm로 측정되었으며 P-값은 0.000으로 분석되었다. P-값이 0.05보다 작으므로 보압에 따른 제품의 전장 치수가 차이가 있음을 알 수 있으며 치명인자로 선정하였다.

Fig. 7은 보압에 따른 제품의 전장 치수 변화를 상자 다이어그램으로 나타내었다.

2.5 실험계획법에 의한 최적화

치명인자로 선정된 냉각시간, 금형온도, 보압에 대해서 3인자 2수준 완전배치법을 사용하여 최적화를 진행하였다. 치명인자 중에서 보압은 제품 중량 4.57 g에 상응하는 조건으로 수준을 선정하였으며 보압시간은 1.3초로 설정하였고, 치명인자 간 교호 작용은 3회 반복하여 분석하였다.

실험계획법의 목적함수는 제품의 전장 치수로 선정하였으며 측정은 3차원 비접촉 측정기로 진행하고 Table 1에 치명인자와 실험수준을 나타내었다.

실험계획법의 결과를 바탕으로 Fig. 8은 전장 치수에 대한 냉각시간, 금형온도, 보압의 주효과도를

Table 1 Conditions of design of experiment (3 factor 2 level)

Factor	Level		Note
	1	2	
A. Cooling time (sec)	3	5	-
B. Mold temperature (°C)	80	100	Core
C. Packing pressure (MPa)	180	220	-

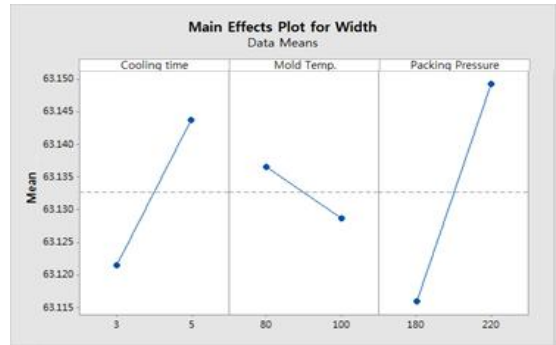


Fig. 8 Main effect diagram for overall width

나타냈었다. 냉각시간은 5초일 때 전장 치수가 기준 전장 치수에 가까웠으며 금형 온도는 80°C일 때, 보압은 220 MPa일 때 전장 치수가 기준 전장 치수에 가깝게 도출되었다.

Fig. 9에 냉각시간, 금형온도, 보압이 전장 치수에 미치는 표준화된 효과에 대한 Pareto 차트를 나타내었다. Figure 9에서 2.120 효과 기준선과 냉각시간, 보압 막대가 교차하고 있으며, 이는 현재 실험 계획법 모형의 $\alpha = 0.05$ 수준에서 냉각시간과 보압이 전장 치수 변화에 유의하다는 것을 보여준다. 반면에 금형온도 및 각 인자 간 교호 작용은 2.120 효과 기준선과 교차하지 않으므로 전장 치수 변화에 유의하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 실험 계획법을 통해 냉각시간과 보압이 전장 치수 변화에 유의한 인자인 것을 도출하였으며, 이를 바탕으로 반응표면분석법을 진행하여 인자별 최적 사출조건을 탐색하였다.

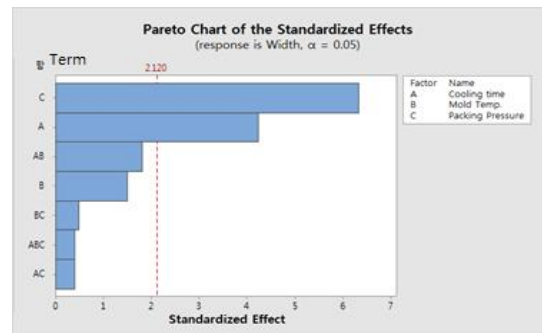


Fig. 9 Pareto chart of standardized effect

2.6 반응표면분석법에 의한 최적화

사출조건 파라미터와 관련된 치명인자의 최적 조건을 도출하기 위해 반응표본 분석설계를 진행하였으며 최대경사법을 이용하여 조건을 탐색하였다. 치명인자는 실험계획법을 통해 전장 치수 변화에 유의한 인자로 확인된 냉각시간과 보압으로 선정하였으며 실험계획법과 같은 2수준으로 1차 반응 모형을 추정하여 분석하였다. Table 2에 반응표면분석법에 사용한 인자와 수준을 나타내었으며 보압시간은 실험계획법과 마찬가지로 1.3초로 설정하였다.

Fig. 10에 냉각시간과 보압에 대한 제품 전장 치수의 등고선도를 나타내었다. 제품의 전장 치수를 Y , 냉각시간을 T , 보압을 P 로 하여 분석 결과에서 추정된 1차 반응 표면식을 나타내면 식(1)과 같다.

$$Y = 62.9989 - (0.00500 \times T) + (0.000750 \times P) \quad (1)$$

추정된 반응표면식의 회귀계수 0.00500, 0.000750 으로부터 변동량을 도출하면 식(2)와 같고 이는 최대경사방향으로 냉각시간이 1단위 증가할 때 보압이 0.15단위 증가한다는 것을 의미한다.

$$\Delta = \left(1, \frac{0.000750}{0.00500} \right) = (1, 0.15) \quad (2)$$

식(1)에 적용한 1차 반응 모형은 반응표면분석법을 진행하면서 추정한 모형이다. 그러므로 1차 반응 모형이 본 해석에서 적합한 모형인지를 확인해야하며 냉각시간과 보압이 해석에서 전장 치수 변화에 유의한 인자인지를 확인해야 한다. 반응표면 분석법을 진행한 결과, 냉각시간은 P-값이 0.041로 분석되었으며 보압은 P-값이 0.000으로 도출되었다.

이는 유의 수준 P-값 0.05보다 작은 값으로 냉각시간과 보압은 전장 치수 변화에 유의한 인자라는 것을 알 수 있다. 또한 각 인자간 적합성 결여의

Table 2 Conditions of response surface methodology (2 factor 2 level)

Factor	Level		Center point
	1	2	
A. Cooling time (sec)	3	5	4
B. Packing pressure (MPa)	180	220	200

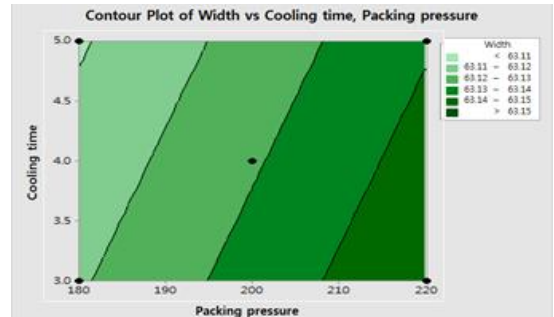


Fig. 10 Contour diagram about effect of cooling time and packing pressure on overall width

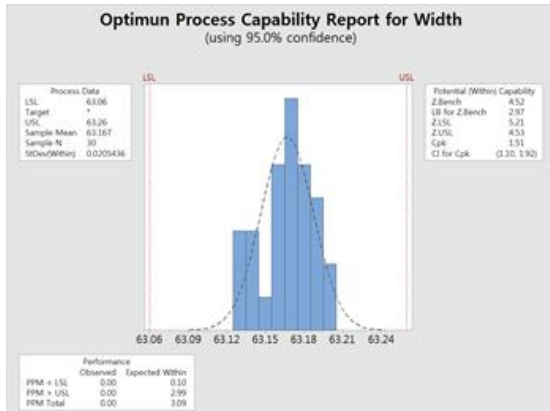
P-값이 0.810으로 유의 수준인 0.05보다 큰 값이 산출되었다. 이는 냉각시간과 보압이 전장 치수에 미치는 영향에 대한 분석 모델로 1차 반응 모형이 적합하다는 것을 의미한다. 식(1)의 1차 반응 표면식에서 결정된 최대경사방향 $\Delta = (1, 0.15)$ 으로 최적 영역을 이동시키면서 최적 인자 조건을 탐색하였다. 식(1)에서 결정된 최대경사방향은 $\Delta = (1, 0.15)$ 이지만 실제 조정 가능한 실험 수준을 고려하여 실험차수별 증가폭을 냉각시간이 0.5단위 증가할 때 보압이 10단위 증가하는 것으로 설정하였다. 냉각시간이 3초, 보압이 180 MPa인 경우부터 최대경사 방향으로 설정한 증가폭으로 인자들을 증가시켜가며 전장 치수 편차의 최소값이 산출되는 조건을 탐색하였다. 분석 결과, 냉각시간이 5초, 보압이 220 MPa일 때 전장 치수가 63.14 mm로 기준 치수와의 편차가 최소가 되는 것을 확인하였으며 이때의 조건들을 최적 조건으로 선정하였다. Table 3에 각 실험차수에 대한 냉각시간과 보압 조건과 전장 치수 결과 값을 나타내었다.

Table 3 Result of steepest descent method of response surface methodology

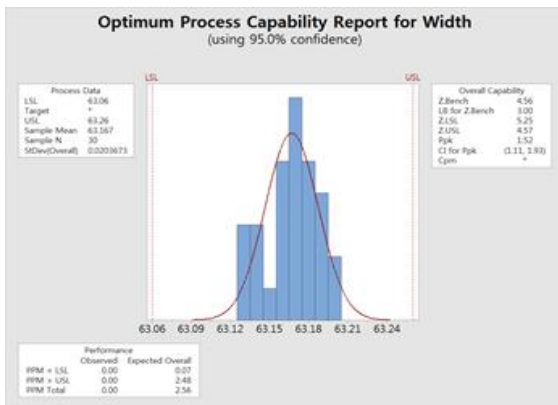
Factor	Overall width (mm)	
Cooling time (sec)	Packing pressure (MPa)	
3	180	63.12
3.5	190	63.12
4	200	63.13
4.5	210	63.13
5	220	63.14

2.7 최적 조건에 대한 개선 능력 확인

실험계획법과 반응표면분석법을 통해 도출한 최적 사출조건은 냉각시간 5초, 금형온도 80°C, 보압 220 MPa이다. 최적 사출조건을 이용하여 휴대폰 후면 커버 제품 30개를 성형하고 전장 치수를 측정한 뒤 기준 전장 치수와 비교하여 개선 공정 능력을 평가하였다. 제품의 평균 전장 치수는 63.17±0.04 mm로 기준 전장 치수 63.16±0.1 mm와 0.01 mm의 편차를 보였다. 이는 공정 개선 전 평균 전장 치수 63.23±0.03 mm와 비교하였을 때 편차가 0.08 mm 정도 개선되었으며 기준 전장 치수의 범위 내로 평균치가 이동한 것을 알 수 있다. 또한 최적 사출조건



(a)



(b)

Fig. 11 (a) Long-term and (b) short-term process capability of improve process conditions

으로 성형한 후면 커버의 외관 품질은 양산품과 동등한 수준으로 웰드라인 등의 결함이 개선된 것을 확인하였다. Fig. 11은 개선된 공정 상태에 대한 장기공정능력, 단기공정능력에 대한 분석을 나타내었다. Zlt는 4.52σ, Zst는 4.56σ, Zshift는 0.04σ로 분석되었으며 개선 전 공정능력과 비교하였을 때, 단기 공정능력은 3.1σ 정도 감소하였으나 여전히 기술력은 우수한 수준을 유지하고 있고 Zshift는 5.35σ 정도 감소하여 공정 관리력이 눈에 띄게 향상되어 우수한 수준으로 평가되었다. 따라서 치수 편차 개선으로 인해 공정능력이 전장 치수 사양 내 평균치로 이동한 것을 알 수 있다.

또한 본 논문은 공정시간의 단축을 통한 휴대폰 후면 커버의 생산수율 향상에 그 목적이 있으므로 실험계획법과 반응표면분석법을 통해 도출된 최적 사출조건이 공정시간 단축에 효과가 있는지를 확인하여야 한다. 개선 전과 개선 후의 공정시간을 분석하여 비교하였을 때, 개선 전 공정조건에서의 공정시간이 18.3초이며 개선 후 공정조건에서의 공정시간은 13.65초로 4.65초 단축된 것을 확인할 수 있으며, 이러한 사실을 바탕으로 본 연구에서 도출한 최적 사출 조건이 휴대폰 후면 커버 생산수율 향상에 효과가 있다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 휴대폰 후면 커버를 대상으로 제품의 생산수율을 높이기 위해 공정시간을 단축시키면서 치수 편차를 최소화하고 외관 불량을 개선시키기 위한 공정 조건을 6 시그마 기법과 실험계획법, 반응표면분석법을 이용하여 도출하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

2-표본 T 검정으로 가인자 분석을 진행한 결과, 제품의 전장 치수에 유의미한 영향을 미치는 치명인자는 냉각시간, 금형온, 보압이었다. 이 중 실험계획법을 통해 표준화된 효과에 대한 Preto 차트를 분석한 결과, 각 치명인자 간에 교호작용은 전장 치수에 유의미한 영향을 끼치지 않으며 치명인자 중에서도 냉각시간과 보압만이 전장 치수에 유의미한 영향을 미치는 것으로 판명되었다. 따라서 실험

계획법의 결과를 토대로 냉각시간과 보압에 대해 반응표면분석법으로 최적 조건을 탐색한 결과 냉각 시간 5초, 보압 220 MPa일 때 전장 치수의 편차가 가장 작은 것으로 나타났다. 또한 금형 온도의 경우 실험계획법의 분석에서 80℃일 때가 최적 조건으로 산출되었다.

이러한 연구 결과를 바탕으로 결정된 최적 공정 조건을 휴대폰 후면 커버 생산공정에 적용한 결과, 전장 치수의 평균값과 목표값 사이의 편차가 기존 공정에서의 0.09 mm에서 0.01 mm로 88.89% 개선되었으며 기존 전장 치수의 범위 내로 평균치가 이동하였다. 또한 웰드라인 등의 외관 결함이 개선된 것을 확인하였다.

개선 전과 개선 후의 공정능력을 비교한 결과, 개선 전의 공정능력 Z_{st} 가 7.62σ , Z_{shift} 가 5.39σ 로 기술력은 우수하고 관리력이 부족하였으나 개선 후의 공정능력에서는 Z_{st} 가 4.56σ 로 3.06σ 감소에도 불구하고 여전히 기술력은 우수하였으며 Z_{shift} 는 0.04σ 로 5.35σ 감소하여 관리력이 우수한 수준으로 평가되었다.

최종적으로 본 연구의 목적인 생산수율 향상에 대해 평가하기 위해 개선 전과 개선 후의 제품의 공정시간을 비교한 결과, 개선 전의 공정시간 18.3초에서 개선 후의 공정시간은 4.65초 단축된 13.65초로 평가되었으며 공정시간 기준으로 생산수율이 34.07% 증가한 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 사용한 6 시그마 프로세스와 실험계획법, 반응표면분석법이 휴대폰 후면 커버의 공정시간을 단축시키고 동시에 치수 최적화에 유의미한 공학적, 통계적 도구이며 실제 생산공정에 적용하였을 때 제품의 양산 기준을 만족시키며 생산수율을 향상시키는데 매우 효과적이라는 것을 실험적으로 확인하였다.

Acknowledgement

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2017R1D1A1B03029639).

REFERENCES

1. Liang, J. Z. and Ness, J. N., "The calculation of cooling time in injection moulding," *Jorunal of the Materials Processing Technology*, Vol. 57, No. 1-2, pp. 62-64, 1996.
2. Rao, N. S., Schumacher, G., Schott, N. R. and O'brien, K. T., "Optimization of Cooling Systems in Injection Molds by an Easily Applicable Analytical Model," *Jorunal of The Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 21, No. 5, pp. 451-459, 2002.
3. Stelson, K. A., "Calculating cooling times for polymer injection moulding," *Part B: Journal of the Engineering Manufacture*, Vol. 217, No. 5, pp. 709-713, 2003.
4. Zarkadas, D. M., Xanthos, M., "Prediction of cooling time in injection molding by means of a simplified semianalytical equation," *Jorunal of the Advances in Polymer Technology*, Vol. 22, No. 3, pp. 188-208, 2003.
5. Lyu, M. Y., Mo, J. H. and Chung, W. J., "Shrinkage in Injection Molded Part for Operational Conditions and Resins," *Elastomers and Composites*, Vol. 38, No. 4, pp. 295-302, 2003.
6. Park, J. C. and Cha, J. H., "Development of Practical Method to Optimize Two-Quality Characteristics in Injection molded Parts," *Jorunal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 90-97, 2015.