

# 휴대폰용 폴리카보네이트 박육 성형품의 수축률 예측 정확도 향상에 관한 연구

예상돈<sup>1</sup>, 김병곤<sup>2</sup>, 민병현<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>동의대학교 기계자동차로봇부품공학부, <sup>2</sup>LG전자 생산기술원

## A Study on the Improvement of Prediction Accuracy of Shrinkage of Polycarbonate Thin Molded Products for Mobile Phones

Sang-Don Ye<sup>1</sup>, Byeong-Gon Kim<sup>2</sup>, Byeong-Hyeon Min<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical, Automobile, Robot Component Engineering, Dong-eui University

<sup>2</sup>Manufacturing Technology Institute, LG Electronics

**요약** 휴대폰의 외관 커버에 적용되는 사출성형품의 두께는 0.5~1.0mm의 얇은 두께를 요구하고 있다. 외관 치수의 신뢰성 확보를 위해 CAE 해석 도구를 활용한 수축률 예측의 정확도를 향상해야 한다. 사출성형기의 응답성, P-V-T 선도 개선 및 용융 수지의 압축성 등을 CAE 해석에 반영하였다. 개선된 CAE 해석 성능의 검증에 위하여 휴대폰 외관을 모사한 두께가 0.7mm인 사각형 시편을 제작하고, 전장 135±0.1mm 및 전폭 70±0.1mm 치수공차에 대한 수축률을 예측하였다. 4가지 수지 및 4가지 사출성형조건에 따라 사출을 하였다. CAE 해석의 정확도는 측정된 수축률에 대한 CAE 해석에서 예측한 수축률의 비율로 정의하였다. 시편의 수축률에 대한 CAE 해석 정확도는 전장 90% 및 전폭 84%가 됨을 확인하여, CAE 해석의 신뢰성을 확보했다고 판단할 수 있었다. 16개 휴대폰 외관 모델에 적용하여 측정된 수축률과 CAE 해석을 통해 예측한 수축률의 정확도 비교 결과, 전장 81% 및 전폭 82%를 반영하는 등 평균 82%의 수축률 예측 정확도를 얻었다. 시편의 결과와 비교하여 양산제품에 대한 수축률 예측 정확도가 2~9% 정도 떨어졌는데, 이는 형상에 기울기가 있고, 두께가 일정하지 않은 등 복잡한 구조 때문으로 판단된다.

**Abstract** The thickness of the exterior of a mobile phone is required to be 0.5~1.0 mm to achieve reduced weight, slimness, and shortening of the development period. It is necessary to improve the accuracy of shrinkage prediction using CAE analysis tools to secure the reliability of external dimensions. In the present study, the responsiveness of the injection molding machine, the improvement of the P-V-T curve, and the compressibility of molten resin were considered in the CAE analysis. Moldex software was used as the CAE tool. An improved CAE analysis was performed on a 0.7 mm-thick rectangular specimen to verify the performance of the analysis. The analysis measured six specimens for four resins and four injection molding conditions. The accuracy of the CAE analysis was defined as the ratio of the shrinkage predicted by the CAE analysis to the measured shrinkage. It was confirmed that the CAE analysis accuracy of the specimen was 90% for the length and 84% for the width. The accuracy of shrinkage for mass production was 81% for the length and 82% for the width. The shrinkage prediction accuracy dropped by 2~9% for mass production due to the component's complex structure.

**Keywords** : Injection Molding, Thin Molded Part, Shrinkage Prediction, CAE Analysis, Mobile Phone

\*Corresponding Author : Byeong-Hyeon Min(Dong-eui Univ.)

email: bhmin@deu.ac.kr

Received November 1, 2021

Revised November 23, 2021

Accepted February 4, 2022

Published February 28, 2022

## 1. 서론

휴대폰 등 전자제품의 경량화, 슬립화, 원가절감 및 개발기간 단축 등에 따라 전자제품의 외관 커버에 적용되는 사출성형품의 두께는 0.5~1.0mm의 얇은 두께를 요구하고 있다[1-3]. 휴대폰 외관 커버의 설계시 전장과 전폭의 길이가 서로 다른 직사각형의 형태로 설계되고 있다. 얇은 두께의 특성 때문에 유동성이 열악하여 금형 캐비티 내부를 충전하기 위해 다점 게이트가 적용되고 있다[4]. 성형 시 게이트와 가까운 곳은 압력이 높아 수축이 적고, 게이트와 먼 곳은 압력이 상대적으로 낮아 수축이 크게 발생하므로 휴대폰 외관 커버의 전장과 전폭의 치수가 금형 치수와 다르게 된다. 신제품 개발 시 양산 전에 CAE 해석을 통한 수축률 예측으로 치수를 관리하므로, 개발기간 단축을 위해 신제품 개발 시 CAE 해석을 통한 수축률 예측의 정확도를 높일 필요가 있다[5-8].

사출성형과정 동안 발생하는 다양한 현상을 최대한 반영하여, 양산 개발 시 박육성형품의 수축률에 대한 CAE 해석의 신뢰성을 높이는 것을 연구목표로 하였다. 이를 위해 사출성형기의 응답 특성을 충전에서 보압 단계로의 전환 과정에 반영하고, 용융수지의 P-V-T 선도를 개선하였으며, 실린더 배럴 내에서 발생하는 용융수지의 압축성을 CAE 해석에 반영하였다. CAE 해석을 통한 수축률 예측 정확도를 확인하기 위해 휴대폰의 외관 커버를 모사하는 시편을 설계 및 제작하고, 실험 및 CAE 해석으로부터 구한 수축률 값을 비교하여 예측 정확도를 산출하였다.

휴대폰의 특성상 극한의 환경에서도 제품의 성능을 보호하고 형상을 유지하기 위해 강한 기계적 물성이 요구된다. 폴리카보네이트(PC: Polycarbonate, 이하 PC) 플라스틱 수지에 유리섬유(GF: Glass Fiber, 이하 GF)와 같은 보강제를 첨가한 PC, PC+GF10%, PC+GF20%, PC+GF30% 등 4가지 수지를 사용하였다. 수축률은 용융수지온도, 금형온도, 보압 및 사출속도 등의 사출성형 공정 조건에 따라 휴대폰 외관 커버의 전장 및 전폭 치수에 영향을 준다[9-12]. 4가지 수지에 대하여 4가지 사출성형공정조건을 적용하여 시편에 대한 실험 및 CAE 해석 수축률 결과를 비교함으로써 CAE 해석을 통한 수축률 예측의 정확도를 확인하였다.

사각형 시편 성형품의 전장과 전폭의 치수를 측정하기 위하여 4가지 수지 및 사출성형조건에 따라 사출을 하였고, 6개의 시편을 측정하여 평균값을 구하였다. 두께는

현장에서 일반적으로 적용하고 있는 박육 두께인 0.7mm로 하였다. 측정기기는 1/1000mm까지 측정이 가능한 형상 측정 공구현미경을 이용하였고, 제품 치수 측정 시 제품의 안정성을 위해 사출성형 후 24시간이 지난 후 시편의 전장과 전폭을 측정하였다.

사출 현장에서는 목표 치수에 맞추어 사출하기보다는 치수공차 안에 들도록 사출하여 성형품의 합부 판정을 하고 있고, 본 연구에서는 두께 0.7 mm에 대해 전장  $135 \pm 0.1$  mm, 전폭  $70 \pm 0.1$  mm의 치수공차를 가지는 시편을 대상으로 연구를 진행하였다. 현장에는 측정 치수가 치수공차의 80% 범위 이내에서는 양품이며, 80%를 벗어나면 불량으로 판정을 한다. 시편을 통하여 성능이 개선된 CAE 해석 방법을 16개 양산 모델에 적용하여 측정된 수축률과 CAE 해석을 통해 예측한 수축률을 비교하였다. 이런 이유로 성형해석에서 정확도를 80% 이상을 확보하려고 하였으며, 최종적으로 CAE 해석을 통한 휴대폰 외관 커버의 전장과 전폭에 대한 수축률 예측의 정확도가 80% 이상으로 향상되었음도 검증하였다.

## 2. 실험

### 2.1 박육성형품 시편 및 금형

Fig. 1은 박육성형품의 외관 치수 신뢰성 확보 및 CAE 해석 정확도 향상을 위해 설계된 시편의 개략도로, 휴대폰 외관 커버를 단순화한 전장(가로) 135mm, 전폭(세로) 70mm, 두께 0.7mm의 평판 사각형 구조이다.

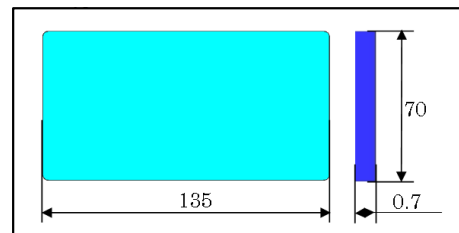


Fig. 1. Schematic diagram of a flat square specimen

Fig. 2는 시편의 사출성형을 위해 제작한 상측 및 하측 사출금형을 보여준다. 3단 금형의 구조에 8개의 핀포인트 게이트와 콜드 러너 시스템을 적용하였다[4].

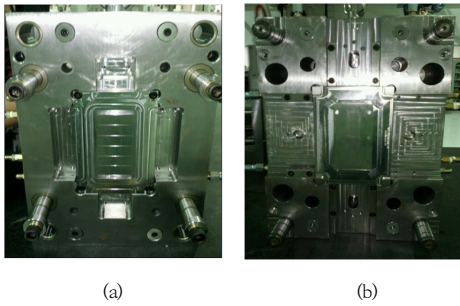


Fig. 2. Photos of injection mold  
(a) Top part of a mold (b) Bottom part of a mold

## 2.2 사출성형공정조건 및 수지 종류

Table 1에 성형품의 수축률 분석을 위한 사출성형공정조건 및 수지 종류를 보여준다. 용융수지온도, 금형온도, 보압 및 사출속도가 적용되었고, 수지는 PC(LG화학 SC1004)와 여기에 보강제인 GF가 0~30% 등으로 함유된 PC 4종류를 사용하였다. 실험은 화낙 180톤 사출성형기를 사용하였으며, CAE 해석은 Moldex S/W를 활용하였다. 각 실험 조건별 24시간의 충분한 시효 수축이 발생한 후, 6개 시편을 측정하였다.

Table 1. Injection molding conditions and resin types

No.	Melting temperature (°C)	Mold temperature (°C)	Packing pressure (MPa)	Injection speed (mm/s)	Resin types
1	290	100	150	150	PC+GF 0% 10% 20% 30%
2	310				
3	330				
4	310	80	150	150	
5		100			
6		120			
7	310	100	100	150	
8			150		
9			200		
10	310	100	150	100	
11				150	
12				200	

## 3. CAE 해석 정확도 개선 연구

### 3.1 사출성형기의 응답성 분석

Fig. 3은 시편 금형에서 실제 충전 및 보압 공정 동안

측정된 사출압력 분포를 보여준다. 충전 후 보압 단계로 전환 시 CAE 해석에서는 직각으로 하락하는 것으로 입력되지만, 보압은 일정 시간을 두고 단계적으로 하락하면서 정해진 보압으로 변환되고 있다. 이는 충전에서 보압 단계로 전환 될 때 금형 캐비티 내부의 압력에 대한 고정밀도 및 고응답의 제어가 CAE 해석에서 반영되어야 함을 의미한다.

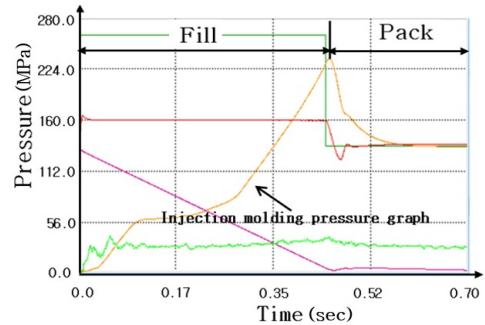


Fig. 3. Pressure distribution in the specimen mold during the filling and packing stages

Fig. 4는 실제 사출성형공정을 근사하여 개선된 CAE 해석용 압력 분포를 보여준다. 충전에서 보압 전환 시 수직으로 하강하는 것이 아니라, 단계별 하락 과정을 거친 후 일정한 보압 상태를 갖도록 시간 상수 1 및 타임 콘트를 0.1을 적용하여 Fig. 3과 같은 사출압력 분포를 모사할 수 있었다.

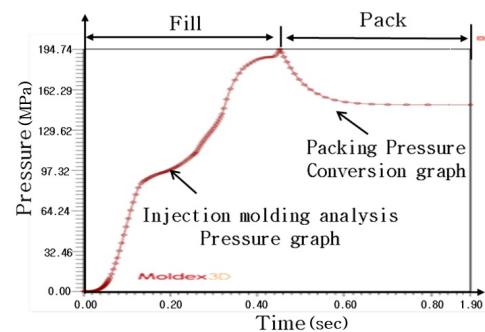


Fig. 4. Pressure distribution for improved CAE analysis reflecting the actual injection process

### 3.2 용융수지의 P-V-T 선도 분석

Fig. 5는 PC 수지에 대해 CAE 해석 시 현재 사용되는 P-V-T 선도과 개선된 방법으로 측정된 P-V-T 선도를 보여준다. 기존 측정 장비(Gottfert사 RHEO-TESTER

1501)에 비해 노즐부의 길이를 최적화한 새로운 장비 (GoTECH사 CR-6000)를 선정한 후 측정된 결과이다. P-V-T 상변화 구간을 지날 때 신규 P-V-T 측정기로 실험한 결과에서 급격한 기울기 변화가 일어난다. 고체 영역에서는 온도 변화에 따른 체적 변화량이 감소했고, 액체 영역에서는 압력이 증가할수록 체적은 급격하게 감소하는 것으로 관찰되었다.

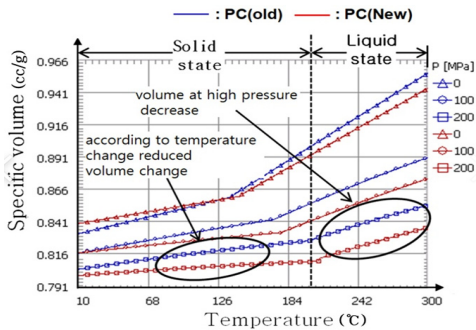


Fig. 5. Current P-V-T plot and P-V-T plot measured with improved methods

Table 2는 기존 및 개선된 P-V-T 선도를 시편에 적용한 후, 실험 및 CAE 해석으로부터 구한 수축률 결과를 보여준다. 시편의 실험 결과 전폭 수축량은 0.31mm 및 수축률은 0.44%, 전장 수축량은 0.61mm 및 수축률은 0.45%였다. 수축률 측정값 대비 CAE 해석의 수축률 예측값의 정확도를 측정값 및 예측값 중 작은 값을 큰 값으로 나눈 비율로 정의하였다. 기존 P-V-T 선도에서는 실험 대비 CAE 해석 정확도 수준이 전폭 80% 및 전장 90%의 결과를 보여준다. 개선된 P-V-T 선도에서는 실험 대비 CAE 해석 정확도 수준이 전폭 94% 및 전장

Table 2. Reliability of improved P-V-T plot on the shrinkage between experimental and CAE analysis results

Shrinkage	Exp. (a)	Present P-V-T		Improved P-V-T	
		CAE (b)	Accuracy (a/b)*100(%)	CAE (c)	Accuracy (c/a)*100(%)
Width (mm)	0.31	0.39	80	0.33	94
Width (%)	0.44	0.55	80	0.47	94
Length (mm)	0.61	0.68	90	0.55	90
Length (%)	0.45	0.50	90	0.407	90

90%로, 전폭의 예측 정확도는 14% 증가하였으나, 전장의 예측 정확도는 유사하게 나타났다.

### 3.3 압축성을 고려한 쿠션 거리 분석

박육 성형품을 사출하기 위해서는 캐비티 내부의 용융수지가 고화되기 전에 고속으로 사출하므로 용융수지의 압축력은 상승하게 된다. 실린더 내부 배럴에 잔류하고 있는 용융수지의 압축력을 고려한 수축률을 예측함으로써 CAE 해석의 신뢰성을 높일 수 있다. 사출성형기의 실린더 내부 배럴의 용융수지 압축성의 유무에 대한 결과로 사출 후 용융수지의 잔량인 쿠션의 거리를 통하여 분석하였다. 시편 사출 시 쿠션 거리는 1.09mm였다. CAE 해석에서 압축성을 고려하지 않으면 쿠션 거리는 10.562mm로 실제 사출 시 쿠션 거리 대비 9.472mm의 차이가 발생하였으나, 압축성을 고려하면 쿠션 거리는 1.158mm로 0.068mm 차이만 보여 용융수지의 압축성을 반영한 효과를 확인할 수 있었다.

## 4. 사출성형조건 및 GF 함유에 따른 실험 및 CAE 해석 수축률 결과

### 4.1 시편에 대한 실험 및 CAE 해석 수축률 분석

실험은 Table 1에서와 같이 사출성형조건 4가지 중 3가지를 중간값으로 고정한 후, 1가지에 대해 3수준으로 변화시키면서, 각 조건에서 PC, PC+GF10%, PC+GF20% 및 PC+GF30% 등 수지 4종류에 대하여 수행되었다. 시편의 전장과 전폭에 대하여 시사출로부터 측정된 수축률 및 CAE 해석에서 예측한 수축률을 비교하여 CAE 해석의 수축률 정확도를 산출하였다.

#### 4.1.1 용융수지온도 및 GF 함유에 따른 수축률

Fig. 6은 실험 및 CAE 해석 결과로부터 용융수지온도에 따른 시편의 전장 및 전폭의 수축률을 보여준다. 전장과 전폭의 수축률은 측정치와 CAE 해석에 따른 예측치간에 동일한 패턴을 보인다. 전폭 보다 전장의 수축률이 높고, GF의 함유량이 많아질수록 수축률이 적다. 용융수지온도의 증가에 따라 수축률이 감소하지만, PC+GF30% 수지는 수축률의 차이가 거의 없다.

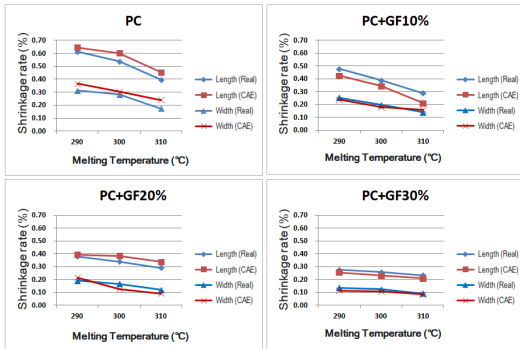


Fig. 6. Shrinkage of length and width of specimen according to melting temperature derived from experiment and CAE analysis

#### 4.1.2 금형온도 및 GF 함유에 따른 수축률

Fig. 7은 실험 및 CAE 해석 결과로부터 금형온도에 따른 시편의 전장 및 전폭의 수축률을 보여준다. 전장과 전폭의 수축률은 측정치와 CAE 해석에 따른 예측치 간에 동일한 패턴을 보인다. 전폭 보다 전장의 수축률이 높고, GF의 함유량이 많아질수록 수축률이 적다. 4가지 수치 모두 금형온도에 따른 수축률 차이는 거의 없다.

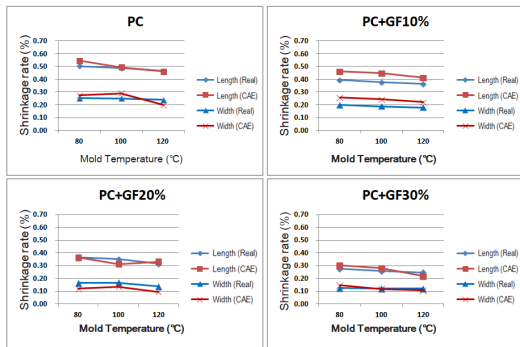


Fig. 7. Shrinkage of length and width of specimen according to mold temperature derived from experiment and CAE analysis

#### 4.1.3 보압 및 GF 함유에 따른 수축률

Fig. 8은 실험 및 CAE 해석 결과로부터 보압에 따른 시편의 전장 및 전폭의 수축률을 보여준다. 전장과 전폭의 수축률은 측정치와 CAE 해석에 따른 예측치 간에 동일한 패턴을 보인다. 보압이 크고 GF의 함유량이 많아질수록 수축률이 적지만, PC+GF30% 수지는 수축률의 차이가 거의 없다.

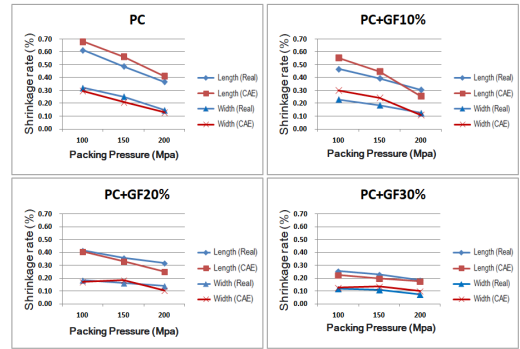


Fig. 8. Shrinkage of length and width of specimen according to packing pressure derived from experiment and CAE analysis

#### 4.1.4 사출속도 및 GF 함유에 따른 수축률

Fig. 9는 실험 및 CAE 해석 결과로부터 사출속도에 따른 시편의 전장 및 전폭의 수축률을 보여준다. 전장과 전폭의 수축률은 측정치와 CAE 해석에 따른 예측치 간에 동일한 패턴을 보인다. 전폭 방향보다 전장 방향의 수축률이 높고, GF의 함유량이 많아질수록 수축률이 적지만, PC+GF10%, PC+GF20% 및 PC+GF30% 수지는 수축률의 차이가 거의 없다.

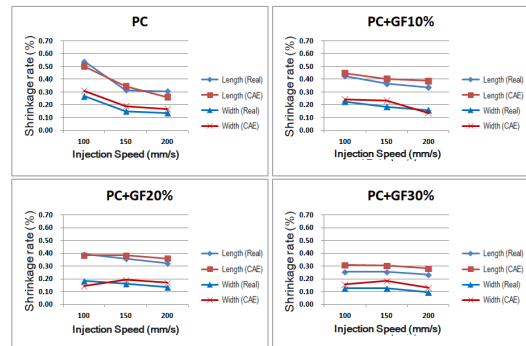


Fig. 9. Shrinkage of length and width of specimen according to injection speed derived from experiment and CAE analysis

#### 4.1.5 CAE 해석 예측 결과의 정확도 분석

Table 3은 Fig. 6~9의 시편의 실험에서 측정된 전장 및 전폭의 수축률과 CAE 해석에서 예측한 전장 및 전폭의 수축률을 비교하여 CAE 해석의 정확도를 산출한 결과를 보여준다. Table 4는 Table 3의 결과를 4가지 사출성형공정조건 및 4가지 수치 종류별로 CAE 해석 예측 정확도의 평균을 보여준다.

Table 3. Raw data of accuracy of CAE analysis for the shrinkage of length and width of specimen(L: length, W: width)

#	Processing Condition	PC		PC+GF10%		PC+GF20%		PC+GF30%		
		L	W	L	W	L	W	L	W	
1	Melting temp. (°C)	290	0.95	0.86	0.89	0.93	0.97	0.88	0.93	0.84
2		300	0.89	0.93	0.89	0.91	0.89	0.75	0.89	0.85
3		310	0.87	0.73	0.73	0.87	0.86	0.76	0.89	0.94
4	Mold temp. (°C)	80	0.92	0.93	0.85	0.77	1.00	0.73	0.91	0.85
5		100	0.98	0.86	0.84	0.78	0.89	0.81	0.92	0.97
6		120	0.99	0.83	0.89	0.81	0.95	0.69	0.88	0.88
7	Packing pressure (MPa)	100	0.90	0.93	0.84	0.76	0.97	0.91	0.89	0.95
8		150	0.87	0.84	0.88	0.76	0.93	0.88	0.88	0.80
9		200	0.89	0.88	0.84	1.13	0.78	0.76	0.94	0.74
10	Injection speed (mm/s)	100	0.93	0.86	0.95	0.95	0.97	0.79	0.83	0.81
11		150	0.91	0.79	0.91	0.91	0.93	0.86	0.84	0.69
12		200	0.86	0.82	0.87	0.87	0.90	0.79	0.83	0.75

Table 4. Accuracy mean of CAE analysis for the shrinkage of length and width of specimen(L: length, W: width)

Resin	PC		PC+GF10%		PC+GF20%		PC+GF30%		Mean	
	L	W	L	W	L	W	L	W	L	W
Melting temp.(°C)	0.90	0.84	0.84	0.90	0.91	0.80	0.90	0.88	0.89	0.85
Mold temp.(°C)	0.96	0.87	0.87	0.79	0.95	0.74	0.90	0.90	0.92	0.83
Packing Pres.(MPa)	0.89	0.88	0.85	0.88	0.89	0.85	0.90	0.83	0.88	0.86
Injection spe.(mm/s)	0.90	0.82	0.91	0.91	0.93	0.81	0.83	0.75	0.89	0.82
Mean	0.91	0.86	0.87	0.87	0.92	0.80	0.89	0.84	0.90	0.84

용융수지온도에 따른 수축률에 대한 CAE 해석의 정확도 평균은 PC가 전장 90% 및 전폭 84%, PC+GF10%가 전장 84% 및 전폭 90%, PC+GF20%가 전장 91% 및 전폭 80%, PC+GF30%가 전장 90% 및 전폭 88% 등이다. 4종류 수지에 대한 수축률의 평균 정확도는 전장 89% 및 전폭 85% 등이다. 금형온도에 따른 수축률에 대한 CAE 해석의 정확도 평균은 PC가 전장 96% 및 전폭 87%, PC+GF10%가 전장 87% 및 전폭 79%, PC+GF20%가 전장 95% 및 전폭 74%, PC+GF30%가 전장 90% 및 전폭 90% 등이다. 4종류 수지에 대한 수축률의 평균 정확도는 전장 92% 및 전폭 83% 등이다.

보압에 따른 수축률에 대한 CAE 해석의 정확도 평균은 PC가 전장 89% 및 전폭 88%, PC+GF10%가 전장

85% 및 전폭 88%, PC+GF20%가 전장 89% 및 전폭 85%, PC+GF30%가 전장 90% 및 전폭 83% 등이다. 4종류 수지에 대한 수축률의 평균 정확도는 전장 88% 및 전폭 86% 등이다. 사출속도에 따른 수축률에 대한 CAE 해석의 정확도 평균은 PC가 전장 90% 및 전폭 82%, PC+GF10%가 전장 91% 및 전폭 91%, PC+GF20%가 전장 93% 및 전폭 81%, PC+GF30%가 전장 83% 및 전폭 75% 등이다. 4종류 수지에 대한 수축률의 평균 정확도는 전장 89% 및 전폭 82% 등이다.

종합적으로 사출성형공정조건 및 수지 종류를 반영한 전장 수축률 예측의 평균 정확도가 90% 및 전폭 수축률 예측의 평균 정확도가 84%가 됨을 확인하였다. 사출 현상에서는 목표 치수에 맞추어 사출하기보다는 치수공차 안에 들도록 사출하여 성형품의 합부 판정을 한다. 성형품의 치수공차 내에 있더라도 치수공차의 80% 범위 이내에서는 양품이며, 80%를 벗어나면 불량으로 판정을 한다. 이는 양산시 치수가 변동하더라도 치수공차 내에서 변동되도록 하여 양품을 유지할 수 있기 때문이다. 이런 이유로 성형해석에서 정확도를 80% 이상을 확보하려고 하였으며, 결과적으로 CAE 해석의 신뢰성을 확보하였다고 판단할 수 있다.

#### 4.2 양산 모델의 실험 및 CAE 해석 수축률 분석

Table 5에 5개월간 양산된 16개의 휴대폰 외관 모델에 대하여 측정된 수축률과 CAE 해석을 통해 예측한 수축률을 비교함으로써 수축률 예측의 정확도가 전장 81% 및 전폭 82% 등 평균 82%가 됨을 확인하였다. 제품의 모델에 따라 수축률 정확도가 양수와 음수로 나타날 수 있으나, 산업현장에서는 모든 제품이 목표 치수에 도달하지는 현실적으로 어려움이 있기에 치수공차 내의 80%에 도달하고자 한다. 측정된 수축률 값은 대부분 정규분포의 형태를 나타내고 있어 본 연구에서는 양수와 음수의 결과를 따로 고려하지 않았다. 추후 형상에 따른 수축률 여부를 연구할 때 추가적인 분석이 필요하다고 판단된다.

Table 4에서 보여준 시편의 전장과 전폭에 대한 CAE 해석 예측 정확도인 90% 및 84%와 비교하여 휴대폰 외관 양산 성형품에 대한 수축률 예측 정확도가 2~9% 정도 떨어졌다. 이는 양산 성형품의 형상에 구배가 있고, 부품 간의 간섭을 방지하기 위해 두께가 0.7~1.0mm로 일정하지 않은 것 등 시편에 비해 복잡한 구조 때문으로 판단된다. 따라서 박육 성형품의 다양한 형상에 따른 수축률 및 변형 등을 포함한 성형품의 기하 공차에 관한 연구가 향후 필요하다고 판단된다.

Table 5. Accuracy of shrinkage of length and width of mass product obtained from experimental and CAE analysis(L: length, W: width)

Model	Resin	CAE(%)		Exp.(%)		Accuracy(%)		
		L	W	L	W	L	W	Mean
1	PC	0.57	0.51	0.47	0.4	82	78	80
2	PC	0.57	0.56	0.58	0.48	98	86	92
3	PC	0.45	0.43	0.63	0.6	71	72	72
4	PC	0.38	0.3	0.54	0.44	70	68	69
5	PC	0.46	0.55	0.6	0.64	77	86	81
6	GF30	0.26	0.34	0.2	0.37	77	92	84
7	PC	0.54	0.52	0.69	0.75	78	69	74
8	PC	0.24	0.31	0.39	0.37	62	84	73
9	PC	0.42	0.49	0.58	0.54	72	91	82
10	PC	0.6	0.59	0.61	0.58	98	98	98
11	GF30	0.12	0.27	0.09	0.23	75	85	80
12	GF10	0.32	0.48	0.45	0.62	71	77	74
13	PC	0.5	0.47	0.47	0.4	94	85	90
14	PC	0.57	0.56	0.58	0.48	98	86	92
15	PC	0.48	0.35	0.59	0.56	81	63	72
16	PC	0.65	0.7	0.64	0.63	98	90	94
Accuracy average of 16 models						81	82	82

Fig. 10에서 보여주는 바와 같이 본 연구 결과를 활용하여 휴대폰 신규 모델의 박육 두께인 외관 성형품의 사출 금형 설계에 최적의 수축률을 반영할 수 있도록 적용 절차를 제시하였다. 이와 같은 절차를 활용하면 개발기간 단축에 따른 비용 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

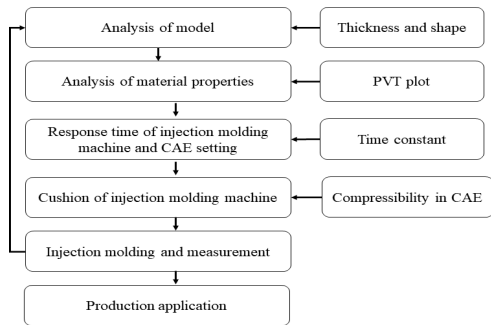


Fig. 10. Flow chart of injection mold design procedure for thin-molded parts

### 5. 결론

- (1) 사출성형기의 충전 단계에서 보압 단계로 전환 시 실제 응답 특성을 CAE 해석에 반영하기 위해, 90도 전환이 아닌 구배 전환이 될 수 있도록 시간상 수렴 타임콘트롤 값으로 1과 0.1을 적용하였다.
- (2) 개선된 P-V-T 선도를 활용한 시편의 전장 및 전

폭 수축률에 대한 CAE 해석 결과, 기존 선도에서 수축률 예측 정확도가 전장 90% 및 전폭 80%인 것에 비해 개선된 선도의 정확도 수준이 전장 90% 및 전폭 94% 수준으로 증가하였다.

- (3) CAE 해석에서 압축성을 고려하지 않으면 실제 노즐의 이동 거리 대비 9mm의 차이가 발생하였지만, 압축성을 고려하면 0.06mm 차이로 CAE 해석에서 실제 사출기의 압축성을 재현할 수 있었다.
- (4) 시편의 측정된 수축률과 CAE 해석을 통해 예측한 수축률의 비교 결과, 전장 수축률 90% 및 전폭 수축률 84%의 정확도를 확인하여 CAE 해석의 신뢰성이 확보되었다고 판단할 수 있었다.
- (5) 16개 휴대폰 외관 양산 모델의 실제 수축률과 개선된 CAE 해석 방법을 통해 예측한 수축률의 비교 결과, 전장 수축률 81% 및 전폭 수축률 82%를 반영하는 등 평균 82%의 수축률 예측 정확도를 얻었다. 이를 기반으로 신규 모델의 금형 제작 시 성형해석 결과를 전장과 전폭의 수축률에 적용하고, 그 결과를 DB로 구축한 후 AI 시스템 등을 통해 자동으로 전장과 전폭의 수축률을 반영하는데 기여할 수 있다.

### References

- [1] R. Selben, "Thin wall molding of engineering plastics-a literature survey", *Journal of Injection Molding Technology*, Vol.4, No.4, pp.159-165, 2000.
- [2] S. H. Lee, S. W. Kim, "A study of injection molding and mold-making for united thin-walled inner-pack case", *Proceedings of Korean Society for Precision Engineering*, KSPE, pp.37-38, 2016.
- [3] Y. M. Heo, K. H. Shin, "A study on the injection molding technology for thin wall plastic part", *J. Korea Society of Die & Mold Engineering*, Vol.10, No.2, pp.50-54, 2016.
- [4] Y. K. Shen, C. W. Wu, Y. F. Yu, H. W. Chung, "Analysis for optimal gate design of thin-walled injection molding", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.35, pp.728-734, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.01.014>
- [5] R. Farooque, M. Asjad, S.J.A. Rizvi, "A current state of art applied to injection moulding manufacturing process-A review", *Materials Today: Proceedings*, Vol.43, pp.441-446, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.967>
- [6] H. Oktem, T. Erzurumlu, I. Uzman, "Application of Taguchi optimization technique in determining

plastic injection molding process parameters for a thin-shell part”, *Materials and Design*, Vol.28, pp.1271-1278, 2007.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2005.12.013>

- [7] D. Masato, J. Rathore, M. Sorgato, S. Carmignato, G. Lucchett, “Analysis of the shrinkage of injection-molded fiber-reinforced thin-wall parts”, *Materials and Design*, Vol.132, pp.496-504, 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.032>
- [8] J. Heinisch, Y. Lockner, C. Hopmann, “Comparison of design of experiment methods for modeling injection molding experiments using artificial neural networks”, *J. of Manufacturing Processes*, Vol.61, pp.357-368, 2021.  
<http://lps3.doi.org.libproxy.deu.ac.kr/10.1016/j.imapro.2020.11.011>
- [9] D. Masato, M. Sorgato, M. Babenko, B. Whiteside, G. Lucchetta, “Thin-wall injection molding of polystyrene parts with coated and uncoated cavities”, *Materials and Design*, Vol.141, pp.286-295, 2018.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.048>
- [10] D. Masato, M. Sorgato, G. Lucchetta, “Analysis of the influence of part thickness on the replication of micro-structured surfaces by injection molding”, *Materials and Design*, Vol.95, pp.219-224, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.115>
- [11] K. Park, S. Choi, S. J. Lee, Y. S. Kim, “Injection molding for a ultra thin-wall part using induction heating”, *J. of Korean Society of Mechanical Engineers, Part A*, Vol.32, No.6, pp.481-487, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2008.32.6.481>
- [12] J. H. Kwon, B. O. Rhee, J. H. Choi, M. S. Cho, J. H. Lee, “A CAE analysis for the effect of mold temperature on ultra-thin wall injection molding”, *Proceedings of Korean Society for Precision Engineering, KSPE*, pp.496-496, 2014.  
<http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02424810>

예 상 돈(Sang-Don Ye)

[정회원]



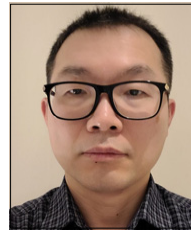
- 2001년 2월 : 동의대학교 동의대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 동의대학교 동의대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2008년 2월 : 동의대학교 산업기술개발연구소 P.D. 연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

생산 및 설계, CAE, 소성가공, 사출성형

김 병 곤(Byeong-Gon Kim)

[정회원]



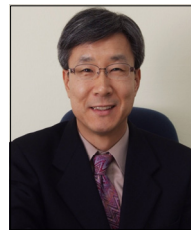
- 2002년 2월 : 동의대학교 동의대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2022년 2월 : 동의대학교 동의대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 11월 ~ 현재 : LG전자 생산기술원 책임연구원

<관심분야>

생산 및 설계, CAE, 사출성형, 금형, 6시그마

민 병 현(Byeong-Hyeon Min)

[정회원]



- 1985년 2월 : 부산대학교 부산대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1992년 12월 : 노스웨스턴대학교 노스웨스턴대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1993년 2월 ~ 1995년 2월 : 고등기술연구원 책임연구원
- 1995년 3월 ~ 현재 : 동의대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

유변학, 사출성형공정, 최적화