



사출성형 공정능력 향상을 위한 비정질 및 결정성 수지의 치수 신뢰성 비교 분석

윤정길^a, 이성현^{b,*}

Comparative Analysis of Dimensional Reliability Between Amorphous and Crystalline Resins for Improving Injection-Molding Process Capability

Jeong-Kil Yoon^a, Sunghyun Lee^{b,*}^a Changsung Precision co., Ltd.^b Department of Smart Manufacturing System, Chosun College of Science & Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received	18	December	2025
Revised	19	January	2026
Accepted	25	January	2026

Keywords:

Injection molding
Process capability index
Polycarbonate
Polypropylene
Dimensional reliability

ABSTRACT

This study investigates the effects of distinct physical properties of amorphous (PC) and crystalline (PP) resins on the injection-molding process capability and dimensional reliability of housing dry-fan components via CAE analysis and experimental verification. Simulation results indicate that whereas PC requires a high injection pressure of approximately 180 MPa, it exhibits stable dimensional behavior with a low volumetric shrinkage of 2.55%. Conversely, although PP allows for low-pressure molding at 30 MPa, it may be severely deformed owing to its high shrinkage rate of 5.23% and significant anisotropy. In actual CTQ measurements, PC demonstrates superior process capability with a C_{pk} of 14.02, whereas PP fails to satisfy specifications, with a C_{pk} of -2.20. These findings suggest that for precision-component design, mold-design compensation and process optimization considering resin crystallization characteristics should be considered instead of relying solely on material substitution for cost reduction.

1. 서론

사출성형(injection molding)은 열가소성 수지를 금형에 주입하여 복잡한 형상의 부품을 고속으로 생산할 수 있는 제조 공법으로, 자동차, 가전, 의료기기 등 산업 전반에서 핵심적인 역할을 담당하고 있다^[1]. 최근 산업계에서는 제품의 경량화, 기능 통합화 추세와 더불어 원가 절감을 위한 소재 대체 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 특히 고가의 엔지니어링 플라스틱(engineering plastics)을 상대적으로 저렴한 범용 플라스틱(commodity plastics)으로 대체하려는 시도가 빈번히 이루어지고 있으나, 이는 성형품의 치수 정

밀도 저하와 조립 불량, 나아가 제품의 내구 신뢰성 하락이라는 심각한 문제를 야기하기도 한다^[2].

사출성형 부품의 품질을 결정짓는 가장 중요한 인자 중 하나는 치수 신뢰성으로 이는 수지의 고유한 물성인 수축 거동에 지배적인 영향을 받는다. 수지는 미세 구조에 따라 크게 비정질(amorphous) 수지와 결정성(crystalline) 수지로 구분되는데, 이들은 용융 상태에서 고화(solidification)되는 과정에서 근본적으로 다른 열적, 기계적 거동을 보인다^[3]. 비정질 수지는 냉각 시 분자 사슬이 무질서하게 얽힌 상태로 동결되어 등방성(isotropic)에 가까운 균일한 수축을 보이는 반면, 결정성 수지는 냉각 과정에서

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-8255

E-mail address: leepr@cst.ac.kr (Sunghyun Lee).

분자가 규칙적으로 배열되는 결정화(crystallization) 현상이 발생하여 급격한 밀도 변화와 체적 감소를 수반한다^[4]. 또한, 결정성 수지는 유동 방향과 그 직각 방향의 수축률 차이가 큰 이방성(anisotropy)을 띠게 되어, 성형 후 예측하기 어려운 뒤틀림을 유발하는 주요 원인이 된다^[5]. 따라서 정밀한 치수 관리가 요구되는 기능성 부품을 개발할 때, 소재의 결정화 특성이 성형 공정과 최종 제품의 품질에 미치는 영향을 사전에 정확히 예측하고 검증하는 절차는 필수적이다.

기존의 사출성형 관련 연구들은 주로 금형 설계 최적화나 특정 단일 소재의 공정 조건 제어에 집중해 왔다. 예를 들어, 게이트 위치나 런너 시스템의 변경을 통해 충전 불균형을 해소하거나^[6, 7], 사출 속도와 보압 프로파일을 조절하여 수축을 최소화하려는 연구들이 다수 수행되었다^[8]. 또한 최근에는 Computer Aided Engineering (CAE) 해석 기술을 활용하여 성형 불량을 사전에 예측하려는 시도가 활발하다. 그러나 선행 연구들의 대부분은 해석 결과인 수축률이나 변형량 수치 자체를 줄이는 데에만 초점을 맞추고 있어, 이러한 해석 결과가 실제 양산 공정에서의 통계적 품질 지표인 공정능력(process capability)과 어떻게 연계되는지에 대한 고찰은 부족한 실정이다^[9, 10]. 특히, 소재의 변형(비정질 ↔ 결정성)이 공정능력지수(Process Capability Index, C_{pk})에 미치는 영향을 정량적으로 비교 분석한 연구는 드물며, 일부 연구에서 Polypropylene (PP) 소재의 치수 안정성을 다루었으나^[11], 고정밀 부품에 대한 직접적인 비교 사례는 제한적이다. 산업 현장에서는 치수가 규격에 들어오기를 넘어 공정이 얼마나 안정적으로 규격을 만족시키는가를 나타내는 C_{pk} 값이 품질 보증의 핵심 척도로 활용되므로 관련 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 가전기기용 핵심 구동 부품인 Housing Dry Fan을 대상으로, 성형 특성이 극단적으로 대비되는 두 가지 소재인 PC와 PP를 선정하여 비교 연구를 수행하였다. PC는 높은 치수 신뢰성과 강성을 가진 대표적인 엔지니어링 플라스틱이며, PP는 우수한 유동성과 경제성을 가졌으나 높은 수축률을 가진 범용 플라스틱이다. 본 연구에서는 Autodesk Moldflow를 활용한 CAE 해석을 통해 두 소재의 충전 패턴, 압력 분포, 체적 수축률 및 변형 거동을 예측하고, 실제 금형을 제작하여 사출 실험을 수행한다. 최종적으로 성형품의 핵심 관리 치수(critical to quality, CTQ)를 측정하여 공정능력지수를 산출함으로써, 해석적 예측과 실제 공정 품질 간의 상관관계를 규명하고 정밀 부품 개발 시 소재 선정 및 금형 설계에 대한 실질적인 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상 선정 및 CAE 해석 조건

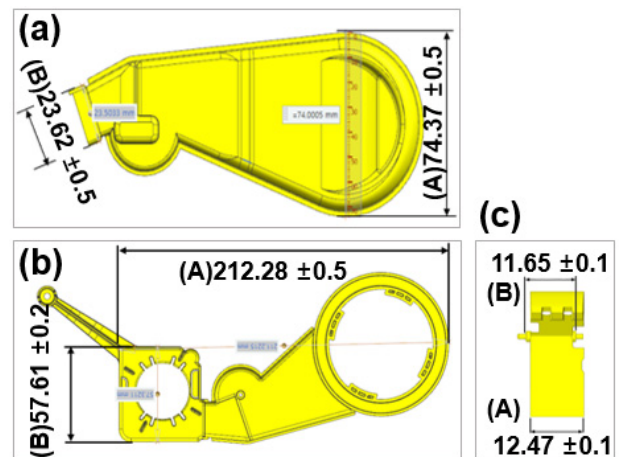


Fig. 1 3D modeling of Housing Dry Fan parts and definition of critical to quality specifications: (a) UP part, (b) LOW part, and (c) KNOB part

본 연구의 대상 모델은 가전제품 내부의 공조 모듈인 Housing Dry Fan 조립체이다. 형상이 복잡하고 치수 관리가 가장 까다로운 상부 커버(UP)를 분석 대상으로 선정하였다. 해당 부품은 내부의 팬과 모터를 보호하는 외관 부품으로 기본 치수는 약 $168.0 \times 74.0 \times 18.5$ mm이며 평균 두께는 1.5 mm이다. 얇은 두께의 구조와 복잡한 곡면 유로 형상을 포함하고 있어 사출성형 시 냉각 불균형에 의한 수축 및 변형 발생 가능성이 높다^[12]. Fig. 1은 Housing Dry Fan 부품의 3D 모델링과 품질 관리를 위한 핵심 치수 규격을 나타낸다. CTQ는 조립성능에 결정적인 영향을 미치는 외곽 원형부 직경 $A(74.37 \pm 0.50\text{mm})$ 와 축 지지부 직경 $B(23.62 \pm 0.20\text{mm})$ 로 선정하였다.

연구의 변별력을 높이기 위해 물성적 거동이 상반되는 두 가지 수지를 선정하였다. 즉 비정질 엔지니어링 플라스틱인 PC (TRIREX 3022L1-12)와 결정성 범용 플라스틱인 PP(BI750)이다. 본 연구에 적용된 두 수지의 주요 물성과 성형 권장 조건, 소재의 결정화도 및 유동성 정보는 Table 1과 같다. 표에서 확인할 수 있듯이, 비정질 수지인 PC는 탄성계수가 높아 기계적 강성이 우수하고 수축률이 낮은 반면, 결정성 수지인 PP는 밀도가 낮고 유동성이 좋으나 결정화로 인해 높은 수축률과 이방성을 가짐을 알 수 있다. 이러한 물성 차이는 최종 성형품의 치수 정밀도에 결정적인 영향을 미치는 변수로 작용한다. 성형 공정의 예측 및 분석을 위해 Autodesk Moldflow Insight 2025 소프트웨어를 사용하였다.

제품 형상 정보는 3D CAD 데이터로부터 추출하였으며, 두께 방향의 유동과 열전달 현상을 정밀하게 모사하기 위해 약 178만 개의 요소를 갖는 3D Tetrahedral Mesh로 모델링하였다. Fig. 2는 생성된 유한요소 메쉬 모델과 사출 주입점(injection location) 및 냉각수 입출구 등의 경계 조건 설정을 보여준다. 해석 정밀도를

Table 1 Material properties and processing conditions of PC and PP resins

Property	PC (TRIREX 3022L1-12)	PP (BI750)
Microstructure	Amorphous	Semi-Crystalline
Melt flow rate (g/10 min)	22 (at 300°C, 1.2 kg)	30 (at 230°C, 2.16 kg)
Elastic modulus (MPa)	2324	1340
Melt density (g/cm ³)	1.034	0.768
Rec. melt temp.(°C)	300	230
Rec. mold temp.(°C)	90	50

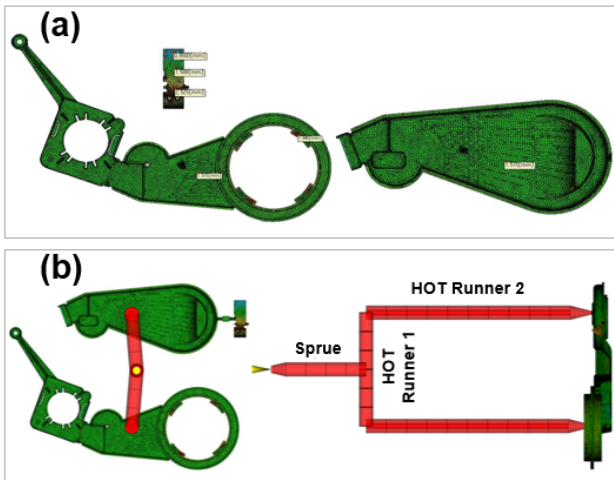


Fig. 2 Finite element mesh model and runner system configuration for CAE analysis: (a) 3D tetrahedral mesh model, (b) hot runner system design and injection location

높이기 위해 제품의 살두께 방향으로 최소 5개 이상의 레이어가 생성되도록 메쉬를 조밀하게 구성하였다. 해석 시퀀스는 Cool - Fill - Pack - Warp를 연계하여 진행하였으며 해석에 적용된 주요 공정 조건은 Table 2와 같다. 해석의 신뢰도를 확보하기 위해 용융 온도와 금형 온도는 각 소재 제조사의 권장 값을 기준으로 설정하였다. 또한, 충전에서 보압으로 전환되는 V/P 전환 시점은 캐비티 체적의 98% 충전 시점으로 설정하여 과충전을 방지하였으며, 보압 크기는 사출 압력의 80% 수준으로 유지하여 수축을 효과적으로 보상하도록 설계하였다.

2.2 금형 설계 및 제작

해석 결과의 실증적 검증을 위해 실제 양산 조건에 준하는 사출 금형을 설계하였다. 금형의 크기는 300 × 350 × 525 mm이며, 베이스 재질은 내마모성과 가공성이 우수한 P20강(Pre-hardened steel)을 사용하였다.

유로 시스템은 수지 소모량을 줄이고 충전 압력 손실을 최소화하기 위해 Hot Runner System을 적용하였다. 주요 치수는 Sprue

Table 2 CAE simulation conditions and parameters

Category	Parameter	PC (TRIREX 3022L1-12)	PP (BI750)
Process	Melt temp. (°C)	300	230
	Mold temp. (°C)	90	50
	Filling control	Ram speed profile	Ram Speed Profile
	V/P switchover	98% filled	98% Filled
	Packing pressure	80% of injection pressure	80% of Injection Pressure
	Cooling time (s)	20	20
Mesh	Type	3D tetrahedral	3D tetrahedral
	Elements count	1783080	1783080

Table 3 Specification of injection mold design

Item	Specification	Note
Mold size	300 × 350 × 525 mm	2-plate type
Mold base material	P20 (Pre-hardened steel)	HRC 28~32
Runner system	Hot runner system	Sprue Ø15 Runner Ø15
Gate type	Pin-point gate (Ø4.0 mm)	Direct to cavity
Cooling channel	Optimized cooling circuit	Ø8.0 mm water line
Cavity	1 cavity	-

Ø15.0 mm, 1차 Runner Ø15.0 mm, 2차 Runner 외경 Ø15.0 mm / 내경 Ø6.0 mm로 설계되었다. 게이트는 성형품의 외관 품질을 고려하여 직경 Ø4.0 mm의 Pin-point Gate 방식을 채택하였으며, 수지가 캐비티 전체로 균일하게 확산될 수 있도록 제품의 살두께가 가장 두꺼운 중심 부위에 배치하였다^[6]. 냉각 채널은 캐비티 표면 온도의 편차를 최소화하기 위해 제품 형상을 따라 균일한 냉각이 이루어지도록 최적화된 냉각 회로를 구성하였다^[13]. 상세한 금형 설계 사양은 Table 3과 같다. Fig. 3은 설계된 금형의 3D 모델링 형상을 보여준다. (a)는 제품의 외관을 형성하는 상측(cavity) 형판의 설계를 나타내고, (b)는 내부 형상과 런너 시스템이 배치된 하측(core) 형판의 설계를 나타낸다.

2.3 공정능력 평가 방법

사출 실험은 150톤급 전동식 사출성형기를 이용하여 수행되었으며, 공정 조건은 CAE 해석 조건(Table 2)과 동일하게 설정하여 외부 변수를 최소화하였다. 성형된 시편은 잔류 응력 완화와 치수 안정화를 위해 항온항습 조건(23±2°C, 50±5% RH)에서 24시간 동안 에이징(aging) 처리를 거쳤다. 정밀 치수 분석을 위해 3차원

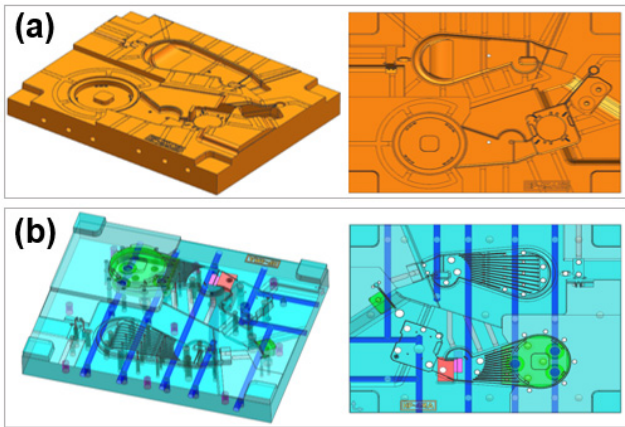


Fig. 3 3D design modeling of the injection mold: (a) cavity plate design and (b) core plate design with runner system

측정기를 사용하여 각 조건당 5개의 시료를 무작위로 추출하여 측정하였다. 측정 대상은 상부 커버 부품의 조립 성능에 직결되는 외관 원형부 직경 A와 축 지지부 직경 B로 선정하였다.

측정된 데이터를 바탕으로 공정능력지수를 산출하여 공정 안정성을 평가하였다. C_{pk} 는 공정의 산포(variability)뿐만 아니라 평균의 치우침(bias)을 동시에 고려하여, 해당 공정이 규격 한계 내에서 양품을 생산할 수 있는 능력을 정량적으로 나타내는 지표이다^[14]. C_p 가 공정의 잠재적 능력만을 평가한다면, C_{pk} 는 실제 생산 능력을 반영한 실질적 지표로서, 통상적으로 1.33 이상일 때 공정이 안정적이라고 판단한다^[15]. C_{pk} 는 규격 상한(USL)과 하한(LSL)에 대해 각각 산출된 값 중 최소값을 취하며, 그 계산식은 다음과 같다.

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right] \quad (1)$$

여기서, μ 는 공정 평균, σ 는 표준편차를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동 특성과 사출 부하 분석

CAE 해석 결과, 두 소재는 점도 특성에 따라 상반된 공정 부하를 나타냈다. 고점도 수지인 PC는 유동 저항이 커 금형 내부를 채우기 위해 V/P 전환 시점에서 약 180 MPa의 높은 사출 압력이 필요하였다. 이는 고사양의 사출기와 높은 형체력이 요구됨을 의미한다. 반면, PP는 전단 박화 효과가 우수하여 약 30 MPa의 낮은 압력만으로도 충전이 완료되었다^[11]. 이는 성형 에너지 효율 측면에서는 높은 유동성을 보이는 PP가 유리하지만, 낮은 사출 압력으로 인해 보압 효과가 충분히 전달되지 못할 경우 수축 제어에 불리하게 작용할 수 있음을 의미한다.

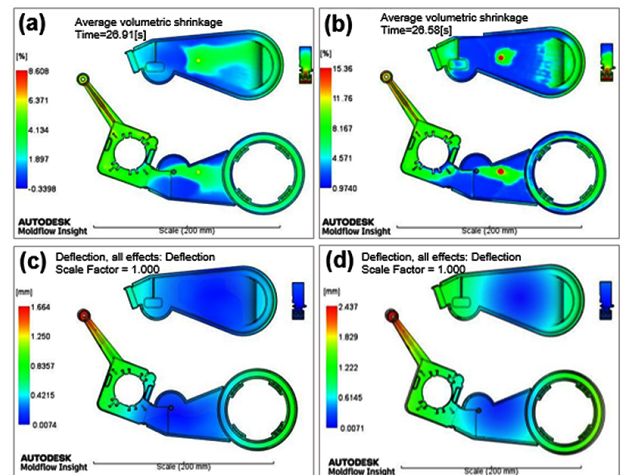


Fig. 4 CAE simulation results: (a) average volumetric shrinkage of PC, (b) average volumetric shrinkage of PP, (c) total deflection of PC, and (d) total deflection of PP

3.2 결정화 유무에 따른 수축 및 변형 분석

PC와 PP 수지의 평균 체적 수축률 분포와 제품 전체 변형량을 통합하여 Fig. 4와 같이 비교하였다. 비정질 수지인 PC(Fig. 4(a))는 평균 수축률이 약 2.55% 수준으로 제품 전반에 걸쳐 균일한 분포를 나타냈다. 이는 냉각 시 등방성(isotropic) 거동을 보이기 때문이다. 반면, 결정성 수지인 PP(Fig. 4(b))는 평균 수축률이 5.23%로 PC 대비 2배 이상 높았으며, 특히 살두께가 두꺼운 리브(rib) 교차부에서 최대 15.36%의 국부적 고수축이 관찰되었다. 이러한 수축률 차이는 최종 제품의 변형으로 직결되었다. 변형 해석 결과를 구체적으로 살펴보면, PC(Fig. 4(c))는 최대 변형량 1.664 mm로 안정적인 형상을 유지한 반면, PP(Fig. 4(d))는 2.437 mm로 약 1.5배 더 큰 뒤틀림이 발생하였다. 이는 결정화 수축에 의한 이방성이 변형의 주된 원인을 의미한다^[5].

3.3 성형품 치수 측정 및 공정능력 분석

해석 결과를 검증하기 위해, 제작된 금형은 설계 모델링과 동일한 형상의 정밀도로 제작되었으며, 핫러너 시스템과 냉각 채널이 정밀하게 가공되었다. 사출 성형한 Housing UP 부품을 육안으로 관찰한 결과 PP 소재는 결정화 수축으로 인해 PC 대비 표면 굴곡이 심하고 뒤틀림이 육안으로 관찰되는 등 외관 품질에서도 차이를 보였다. 또한, 핵심 관리 치수(A, B)를 측정하고 CAE 해석 예측값과 실제 측정 평균값에 대한 공정능력지수를 Table 4에 통합하여 비교 분석하였다. 각 조건당 5개의 시료(n=5)를 대상으로 측정된 치수 결과와 C_{pk} 분석 값을 요약하였다.

3.3.1 해석적 예측과 실측치 분석

비정질 수지인 PC는 해석치와 실측치 간의 오차가 최대 0.084%

Table 4 Comparison of CAE predictions and actual process capability

Item	PC		PP	
	A	B	A	B
Spec.(mm)	74.37±0.5	23.62±0.2	74.37±0.5	23.62±0.2
CAE (predicted)	74.24	23.65	74.78	23.75
Actual (mean)	74.22	23.67	75.01	23.79
Error(%)	0.027	0.084	0.306	0.168
Std. dev	0.01	0.01	0.02	0.01
C_p	16.67	6.67	8.33	6.67
C_{pk}	14.02	4.92	-2.20	1.02
Result	Pass	Pass	Fail	Fail

이내로 매우 높은 일치도를 보였다. 이는 PC의 등방성 수축 거동이 시뮬레이션 모델에서 정확하게 묘사되었음을 의미한다. 반면, 결정성 수지인 PP는 오차율이 0.306% 수준으로 PC보다 상대적으로 높았으나, 실측치와 해석치 모두 규격 중심(74.37 mm)보다 크게 형성되는 치수 팽창 및 변형 경향성은 정확히 일치함을 확인하였다. 이러한 오차는 실제 결정성 수지가 금형 내부에서 겪는 복잡한 열적 이력과 결정화도가 해석 모델보다 더 민감하게 작용한 결과로 판단된다.

3.3.2 공정능력 평가

통계적 품질 지표(C_p , C_{pk})를 통한 공정 능력 평가 통합 표에서 PP 소재의 경우 공정의 잠재적 능력을 나타내는 C_p 는 8.33으로 매우 높아 산포(variation) 자체는 안정적이었으나, 결정화 변형으로 인한 평균값의 치우침(bias) 때문에 실제 공정 능력인 C_{pk} 는 -2.20으로 급락하였다. 반면, PC 소재는 높은 치수 재현성을 바탕으로 C_{pk} 가 14.02으로 우수한 결과를 보였다. 이는 정밀 부품 설계 시 단순히 공정 조건을 제어하는 것보다 소재의 수축 특성을 고려한 금형 역보정 설계가 품질 보증의 선결 과제임을 정량적으로 입증한다.

4. 결론

본 연구에서는 물성적 차이가 뚜렷한 PC와 PP 두 소재를 대상으로 사출성형 부품의 치수 신뢰성 확보 방안을 고찰하였다. CAE 해석과 실측 데이터를 통합 분석한 결과, 다음과 같은 주요 결론을 도출하였다.

(1) 소재 특성과 공정 능력의 상관관계 규명

정밀한 치수 관리가 요구되는 기능성 부품에는 비정질 수지(PC)의 적용이 필수적임을 정량적으로 입증하였다. PC는 180 MPa의

고압 사출 조건이 요구되나, 등방성 수축 특성에 힘입어 C_{pk} 14.02라는 매우 우수한 공정 능력을 달성하였다. 반면, 결정성 수지(PP)는 평균 5.23%의 높은 체적 수축률과 결정화에 따른 이방성으로 인해 치수 규격을 벗어나 C_{pk} -2.20을 기록하였다. 이는 단순한 원가 절감을 목적으로 PP를 대체 적용할 경우, 정밀 부품 소재로 부적합함을 확인하였다.

(2) 결정성 수지 적용 시 설계 가이드라인

PP와 같은 결정성 수지는 유동성이 우수하여 저압 성형(30 MPa)이 가능하지만, 비정질 수지 대비 약 1.5배 높은 변형량을 보였다. 따라서 정밀 부품에 PP를 적용하기 위해서는 단순한 수축률 보정을 넘어 변형 발생 부위를 사전에 예측하여 금형 형상을 반대로 가공하는 역보정 설계와 변형 억제를 위한 특화된 냉각 채널 설계가 선행되어야 한다.

(3) CAE 기반 가상 검증의 유효성

해석을 통해 예측된 수치별 변형 경향성은 실제 성형품의 치수 측정 결과와 높은 정합성을 보였다. 특히 시뮬레이션에서 예측된 PP의 국부적 수축 집중 부위가 실측 공정능력지수 저하의 주요 원인임이 확인되었다. 이는 금형 제작 전 단계에서 양산 품질 리스크를 사전에 예측할 수 있는 유효한 지표임을 입증하였다.

본 연구는 단일 게이트 조건에서의 비교 분석이라는 한계가 있으나, 소재의 결정화 유무가 치수 신뢰성에 미치는 지배적인 영향을 규명했다는 점에 의의가 있다. 향후 연구에서는 결정성 수지의 수축 이방성을 제어하기 위한 다점 게이트 시스템 최적화 및 동적 금형 온도 제어 기술에 대한 심화 연구를 통해 범용 소재의 적용 범위를 확대할 필요가 있다.

References

- [1] Ha, S. M., Kim, Y. H., Choi, Y. S., Han, S. Y., 2024, Optimization of Injection Molding Conditions for Reducing Deformation of Plastic Console Trays for Automobiles: Application of the Taguchi Method, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 23:5 54-60, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2024.23.05.054>.
- [2] Lee, J. Y., Lee, H. J., Kwak, J. S., 2024, Deflection Analysis and Optimization of Rotating Unit Using Three-dimensional Injection Molding Simulation, Journal of Power System Engineering, 28:4 67-73, <https://doi.org/10.9726/kspspe.2024.28.4.067>.
- [3] Choi, Y. S., Han, S. R., Jeong, Y. D., 2005, The Behavior of Shrinkage on PMMA in Injection Molding Compression Molding, Journal of Power System Engineering, 9:4 83-89.
- [4] Jung, T. S., Jang, J. H., Kim, J. S., 2017, A Study on the Filling

Pattern Imbalance in High Speed Injection Molding Process for Thin Light Guide Plate, Polymer Korea, 41:1 30-38, <https://doi.org/10.7317/pk.2017.41.1.30>.

- [5] Park, G. T., Ban, S. H., Lyu, M. Y., 2025, Study on the Orientation of Two-dimensional Shaped Additives in Injection Molded Specimen Containing Protrusion Shape, Polymer Korea, 49:1 121-130, <https://doi.org/10.7317/pk.2025.49.1.121>.
- [6] Moon, J. S., 2014, Optimization of Gate Location Using Computer-Aided Injection Molding Analysis, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 15:10 5968-5973, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.10.5968>.
- [7] Jang, S. M., Baek, S. Y., 2021, Effect of Gate Position on the Deformation of Injection Molds, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 30:1 85-91, <https://doi.org/10.7735/ksmt.2021.30.1.85>.
- [8] Lee, Y. W., Han, S. R., 2020, A Study on The Flow Deviation of Flow Front and Structure in Injection Molding, Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, 22:6 1178-1183, <https://doi.org/10.17958/ksmt.22.6.2020.1178>.
- [9] Jeon, K. I., Noh, S. K., Kim, D. H., 2011, A Study on the Runner System for Filling Balance in Multi-cavity Injection Molds, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 12:4 1581-1588, <http://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.4.1581>.
- [10] Lho, T. J., Kim, K. S., 2008, An Analysis of Plastic Injection Molding Process for Automobile Gearbox Cover by Moldflow, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 9:6 1494-1499, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2008.9.6.1494>.
- [11] Galve, J. E., Elduque, D., Pina, C., Clavería, I., Acero, R., Fernández, Á., Javierre, C., 2019, Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene, Polymers, 11:6 1063, <https://doi.org/10.3390/polym11061063>.
- [12] Hong, S. K., 2015, Experimental and Numerical Analysis on Thin-Walled Injection Molding with Micro Patterns, Master's thesis, Inha University, Republic of Korea.
- [13] Ahn, D. G., Park, M. W., Kim, H. S., 2012, A Study on the Design of Cooling Channels of Injection Mould to Manufacture a Flat Part with a Partly Thick Volume, J. Korean Soc. Precis. Eng., 29:8 824-833, <https://doi.org/10.7736/KSPE.2012.29.8.824>.
- [14] Montgomery, D. C., 2019, Introduction to Statistical Quality Control (8th ed.), John Wiley & Sons, New York.
- [15] Kane, V. E., 1986, Process Capability Indices, J. Qual. Technol., 18:1 41-52, <https://doi.org/10.1080/00224065.1986.11978984>.



Jeong-Kil Yoon

Executive Director in the Changsung Precision Co., Ltd. His research interests include the injection molds, related components, and materials.

E-mail: jeongkily@naver.com



Sunghyun Lee

Assistant Professor in the Department of Smart Manufacturing System, Chosun College of Science & Technology. His research interests include the design and health assessment of the mechanical system.

E-mail: leepr@cust.ac.kr