

사출성형 해석을 통한 차량용 바이오 센서 홀더의 제조 공정 최적화 및 품질 예측에 관한 연구

송제호*, 서중석**

*전북대학교 융합기술공학부(IT응용시스템공학)

**전북대학교 IT응용시스템공학과

e-mail:songjh@jbnu.ac.kr

A Study on the Optimization of Manufacturing Process and Quality Prediction for an Automotive Bio sensor Holder via Injection Molding Analysis

Je-Ho Song*, Joong-Seok Seo**

*Dept. of Convergence Technology Engineering(IT Applied System Engineering),
Chonbuk National University

**Dept. of IT Applied System Engineering, Chonbuk National University

요약

본 논문은 차량 스티어링 휠에 장착되는 바이오 센서 홀더의 성공적인 양산을 위해 사출성형 공정에 대한 CAE 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 센서 홀더는 정밀한 치수와 안정적인 구조가 요구되는 부품으로, 제조 과정에서 발생 할 수 있는 잠재적 결함을 사전에 예측하고 최적의 성형 조건을 도출하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 CAE 해석을 통해 센서 홀더의 상부 및 하부 파트에 대한 충진, 보압, 냉각, 변형에 이르는 전 과정을 시뮬레이션하였다. 해석결과, 충전 과정에서 미성형이나 에어트랩과 같은 심각한 결함을 발생하지 않았으며, 웨드라인 또한 구조적으로 취약하지 않은 위치에 형성되고 강도저하가 미미할 것으로 예측되었다. 최종 변형 해석에서는 상부 및 하부 파트에서 각각 최대 1.016 mm와 1.031 mm의 총 변형량이 예측되었으며, 이는 부품의 비대칭적 형상과 두께편차에 따른 불균일한 체적 수축에 기인하는 것으로 분석되었다. 본 연구는 금형 제작 전 잠재적인 문제를 식별하고, 성형 품질을 확보하기 위한 공정 조건 최적화의 데이터로 활용될 수 있음을 시사한다.

1. 서론

최근 자동차 산업은 제조 중심에서 체험 중심으로 가치가 급변하고 있다. 이러한 변화의 핵심 기술 중 하나는 운전자의 상태를 실시간으로 모니터링하는 운전자 모니터링 시스템(DMS)이며, 특히 심전도(ECG) 등 생체 신호를 정밀 측정하는 바이오 센싱 기술이 중대한 역할을 담당한다. 본 연구 대상인 바이오 센서 홀더는 스티어링 휠에 장착되어, 센서를 안정적으로 보호하고 정밀한 위치 고정을 수행하는 핵심 부품으로서, 복잡한 형상과 제한된 조립 공간 때문에 높은 치수 정밀도와 내구성 확보가 필수적이다.[1,2]

이러한 복잡한 형상의 플라스틱 부품을 생산하는 데 가장 널리 사용되는 공법은 사출성형이다. 사출성형은 생산성이 높고 정밀한 제품을 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 용융된 수지가 금형 캐비티를 채우고 냉각되어 고화되는 과정에서 수축 및 변형이 필연적으로 발생한다. 특히 제품의 두께가 불균일하거나 복잡한 형상을 가질 경우, 불균일한 수축으로 인해 뒤틀림, 웨드 라인, 싱크 마크 등의 성형 불량이 발생할 수 있다. 이러한 결함은 부품의 조립성을 저해하고 센서의 측정 정밀도에 영향을 미치며, 외관 품질을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다.

따라서 금형을 실제로 제작하기 전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통해

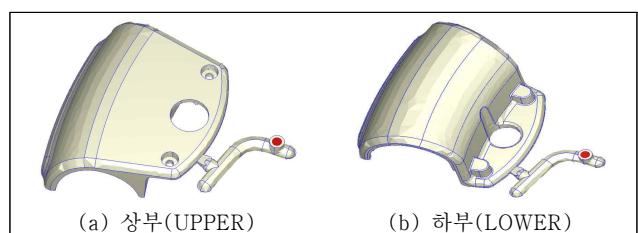
사출성형 공정을 해석하고 잠재적인 문제점을 예측하는 것은 개발 시간과 비용을 절감하고 제품의 품질을 확보하는 데 중요하다.[3]

본 논문에서는 바이오 센서 홀더의 상부 및 하부 파트에 대해 사출 성형 해석을 수행하여, 충진 해석, 보압 및 냉각해석 및 변형해석을 통해 제품을 분석하였다.[4] 이를 통해 현재 설계된 제품의 성형성을 검토하고, 발생 가능한 결함을 예측하여 안정적인 제품 생산을 위한 공학적 데이터를 확보하고자 한다.

2. 해석 모델 및 조건

2.1 해석 모델

해석 대상은 스티어링 휠 장착용 바이오 센서 홀더로, 상부와 하부 두 개의 파트로 구성된다.



[그림 1] 스티어링 휠 장착용 홀더 모델링

각 파트의 3D 모델을 활용하여 솔리드 메쉬를 생성하였으며, 해석의 정확도를 확보하기 위해 충분한 수의 요소를 사용하였다.

각 파트의 주요 제원은 아래 표 1과 같다.

[표 1] 해석 모델의 주요 제원

구분	상부 파트	하부 파트
메쉬 타입	Solid	Solid
파트 요소 수	36,325개	39,457개
파트 크기(mm)	97.86×78.78×26.16	97.86×78.78×49.13
파트 체적(cc)	24.9615	30.8491

2.2 사용 재료

제품의 재료는 LG화학에서 생산하는 폴리프로필렌(PP)계열의 Lupol-HI-4352L로 선정하였다. 이 재료는 내충격성과 성형성이 우수하여 자동차 내장 부품에 널리 사용된다 해당 재료의 주요 물성치는 표 2와 같다.

[표 2] Lupol HI-4352L의 주요 물성치

항목	값	단위
제조사	LG Chemical	-
수지 온도 범위	210 ~ 240	°C
금형 온도 범위	40 ~ 90	°C
유리 전이 온도	140	°C
취출 온도	123	°C

2.3 성형 조건

시뮬레이션에 적용된 성형 조건은 실제 생산 조건을 고려하여 설정하였다. 충전 시간, 용융 수지 및 금형 온도, 보압 프로파일 등 핵심 공정 변수를 표 3에 정리하였다.

[표 3] 사출성형 공정 조건

공정 변수	상부 파트	하부 파트	단위
충전 시간	1.25	1.08	sec
용융 온도	225	225	°C
금형 온도	65	65	°C
최대 사출 압력	140	140	MPa
보압 시간	10.6	12.1	sec
최대 보압 압력	140	140	MPa
냉각 시간	23.3	25	sec
사이클 타임	40.15	43.18	sec

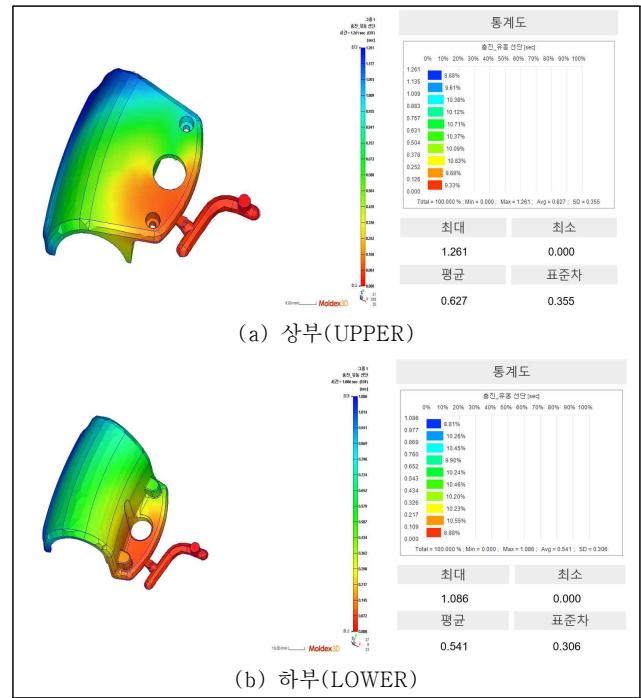
3. 해석 결과 및 고찰

3.1 충진 해석

충진 해석은 용융 수지가 금형 캐비티를 완전히 채우는 과정을 예측하여 미성형, 웨드 라인, 에어 트랩 등의 발생 가능성을 검토하는 단계이다.

3.1.1 유동 선단(Melt Front)

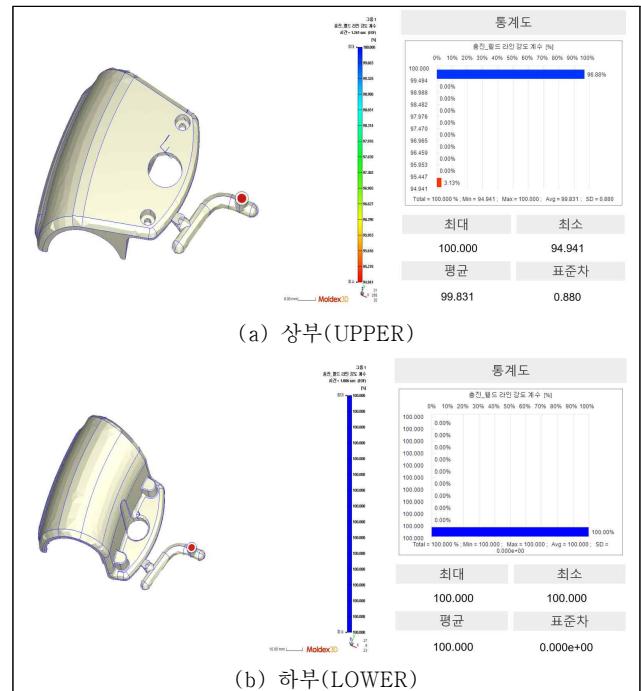
상부 및 하부 파트 모두 설정된 충전 시간(각각 1.261초, 1.086 초) 내에 캐비티가 완전히 충전되는 것으로 나타났다. 유동 패턴은 비교적 균형 잡힌 형태로, 유동 지연이나 미성형의 위험은 없는 것으로 판단된다.



[그림 2] 스티어링 휠 장착용 홀더 충진 해석

3.1.2 웨드 라인(Weld Line)

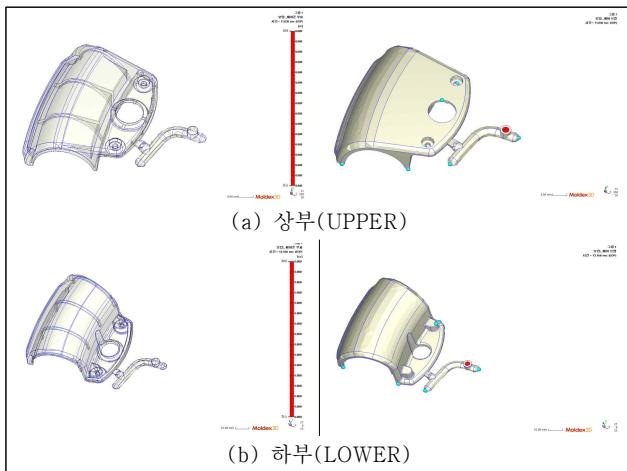
두 개 이상의 용융 수지 흐름이 만나는 지점에 웨드 라인이 형성되었다. 웨드 라인은 외관 불량을 유발하고 기계적 강도를 저하시킬 수 있는 잠재적 결함이다.[5] 해석 결과, 웨드 라인은 주로 제품의 홀 주변부 및 유동 말단부에서 형성되었다. 그러나 웨드 라인 교차각이 대부분 80도 이상으로 양호하게 나타났으며, 웨드 라인 강도 계수 또한 95% 이상으로 예측되어 구조적 취약점으로 작용할 가능성은 낮은 것으로 분석되었다.



[그림 3] 스티어링 휠 장착용 홀더 웨드라인 강도 계수

3.1.3 에어 트랩(Air Trap)

유동 말단이나 수지가 합쳐지는 부위에서 공기가 빠져나가지 못하고 갇히는 현상인 에어 트랩은 외관 불량 및 강도 저하의 원인이 된다. 시뮬레이션 결과, 두 파트 모두 심각한 수준의 에어 트랩은 관찰되지 않았으며, 이는 금형 설계 시 적절한 가스 벤트를 통해 충분히 제어 가능한 수준임을 시사한다.

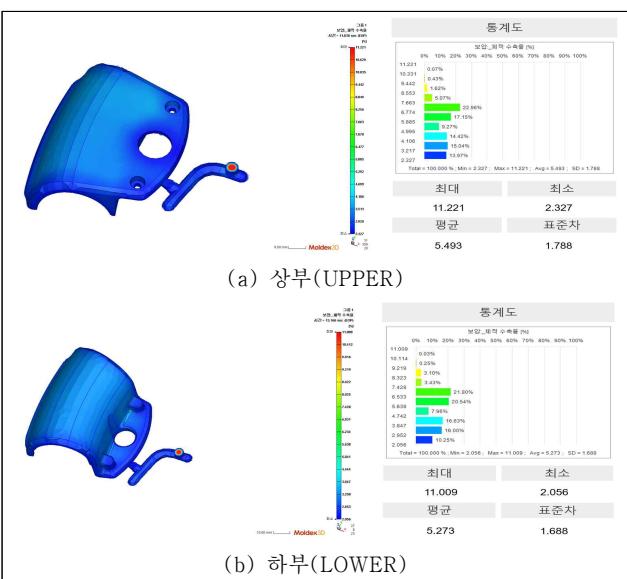


[그림 4] 스티어링 휠 장착용 홀더 에어 트랩 확인

3.2 보압 및 냉각 해석(Packing and Cooling Analysis)

보압 공정은 충전 후 수지의 냉각 수축을 보상하기 위해 추가적인 압력을 가하는 단계이다. 이 과정에서의 압력 전달 효율은 제품의 체적 수축률에 직접적인 영향을 미친다.

해석 결과, 게이트로부터 면 유동 말단부로 갈수록 보압 전달 효율이 감소하여 상대적으로 높은 체적 수축률을 보였다. 특히 제품의 두께가 두꺼운 영역(Rib 또는 Boss)은 얇은 영역에 비해 냉각 속도가 느려 더 많은 수축이 발생한다. 이러한 불균일한 체적 수축 분포는 최종 제품의 뒤틀림을 유발하는 주된 원인으로 작용한다.



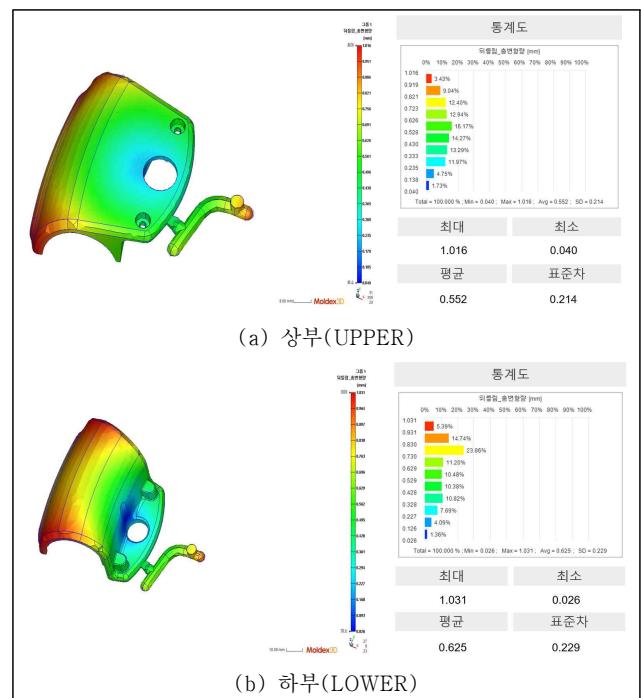
[그림 5] 스티어링 휠 장착용 홀더 체적 수축률 확인

3.3 변형 해석(Deformation Analysis)

변형 해석은 사출 공정이 완료되고 제품이 금형에서 취출되어 상온으로 냉각되었을 때 발생하는 최종적인 형상 변화를 예측한다. 이는 제품의 치수 정밀도와 조립성을 평가하는 가장 중요한 지표이다. 각 파트의 변형 해석 결과는 표 4와 같다.

[표 4] 변형 해석 결과 요약

변形량(mm)	상부 파트	하부 파트
X축 방향 변형	-0.897 ~ 0.785	-0.897 ~ 0.785
Y축 방향 변형	-0.740 ~ 0.713	-0.747 ~ 0.719
Z축 방향 변형	-0.233 ~ 0.394	-0.627 ~ 0.310
총 변형량	0.040 ~ 1.016	0.026 ~ 1.031



[그림 6] 스티어링 휠 장착용 홀더 뒤틀림 총변형량 확인

해석 결과, 상부 파트에서는 최대 1.016mm, 하부 파트에서는 최대 1.031mm의 총 변형량이 예측되었다. 이러한 변형은 주로 제품의 평탄도가 중요한 넓은 면적과 양 끝단에서 집중적으로 발생하였다. 변형의 주된 원인은 앞서 분석한 바와 같이 제품의 비대칭적 형상과 두께 편차로 인한 불균일한 냉각 및 수축이다.

최대 약 1.0mm 수준의 변형량은 부품의 전체 크기를 고려할 때 일반적인 수준으로 볼 수 있으나, 바이오 센서와 같은 정밀 부품과의 조립 공차 및 스티어링 휠 장착시의 단차를 고려하여 허용 가능 여부를 반드시 검토해야 한다. 만약 허용 공차를 초과할 경우, 금형 설계 단계에서 예측된 변형량을 역으로 고려한 역변형 설계를 적용하거나, 보압 조건 및 냉각 채널 설계를 최적화하여 변형을 최소화하는 방안을 강구해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 차량용 바이오 센서 홀더의 사출성형 공정을 CAE 시뮬레이션을 통해 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

현재 설정된 성형 조건 하에서 상부 및 하부 파트 모두 미성형이나 심각한 에어 트랩 없이 캐비티가 완전히 충전될 것으로 예측되어 양호한 충전 특성을 보였다.

웰드 라인은 구조적으로 중요하지 않은 영역에 형성되며, 강도 저하 또한 미미하여 제품 성능에 미치는 영향은 적을 것으로 판단된다.

최종 제품의 변형 해석 결과, 상부 및 하부 파트에서 각각 최대 1.016mm와 1.031mm의 총 변형이 예측되었다. 이는 부품의 형상적 특성에 기인한 불균일 수축이 주된 원인이다.

사출성형 해석을 통해 금형 제작 및 시험 사출 이전에 성형성과 최종 품질을 예측함으로써, 개발 과정에서의 시행착오를 줄이고 원가 및 시간 절감에 기여할 수 있음을 확인하였다.

향후, 예측된 변형량을 바탕으로 조립 공차를 검토하고, 필요시 금형에 역변형을 적용하거나 성형 조건을 추가적으로 최적화하는 연구를 통해 제품의 완성도를 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

Dhahran, Saudi Arabia: King Fahd Univ. of Petroleum and Minerals, Dec. 2002, pp. 335-347.

참고문헌

- [1] Lauris Melders, Ruslans Smiggins and Aivars Birkavs, "Recent Advances in Vehicle Driver Health Monitoring Systems", Sensors, vol. 25, no. 6, pp. 1812, Mar. 2025. DOI: 10.3390/s25061812
- [2] SYSGO GmbH, Driver Monitoring System (DMS): Ensuring Safe Operations Outside and Inside, SYSGO Automotive Use Case, Rel. 1.2, Mar. 2022.
- [3] Asahi Kasei Corporation, "Predicting molding defects using injection molding analysis," Fundamentals of CAE Analysis for Plastic Product Design, Part 7, Sep. 2025.[Online]. Available:
<https://www.asahi-kasei-plastics.com/en/knowledge-cae/plastics-cae7/>
- [4] Y.-M. Huang, W.-R. Jong, and S.-C. Chen, "Transfer Learning Applied to Characteristic Prediction of Injection Molded Products," Polymers, vol. 13, no. 22, pp. 3874, Nov. 2021.
- [5] K. Mezghani, "Modeling and Simulation of Weldlines in Injection Molding Process," in Proc. 6th Saudi Engineering Conf., vol. 2,