

안정적인 사출성형조건의 탐색을 위한 지원시스템

김보현[†] · 백재용 · 이일량

한국생산기술연구원, 지능형 생산시스템 팀

A Support System for Searching Robust Injection Molding Condition

Bo Hyun Kim · Jae Yong Baek · Il Lang Yi

Intelligent Manufacturing Systems Team, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Cheonan, 330-825

Injection molding has been widely used in producing plastic parts in large quantities. However, its productivity mainly depends on the expertise and experience of skilled workers because of the difficulty and complexity to determine a robust injection molding condition which is not influenced by the minor operational variation of an injection molding machine and produces good parts continuously. This study analyzes the defect types of the parts and proposes a support system to assist users in determining the robust process condition. The support system calculates the start condition from the information of an injection mold, the injection molding machine, the resin used, and the part. Through the iterative step which updates the condition using the defect information of the part tested, users can obtain the initial condition which produces the part without any problem for the first time. The support system also assists users in obtaining the robust condition from the initial condition using the technique of experimental design. To prove the validity of the support system, this study implements it in the control panel of the injection molding machine.

Keywords: injection molding, start condition, initial condition, robust condition, design of experiment

1. 서론

플라스틱 사출성형은 고온의 용융 수지를 압력을 가하면서 금형 캐비티에 밀어 넣고 냉각시켜서 성형품을 얻는 생산공정이다. 적은 비용으로 비교적 정밀한 제품까지도 대량생산할 수 있는 장점 때문에 사출성형은 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 그렇지만 재료, 사출성형기, 금형 및 생산환경에 따라 성형조건이 다르고 동일한 성형조건을 계속적으로 제어할 수 없기 때문에 성형조건을 설정하고 관리하는 업무는 대부분 숙련된 작업자의 노하우와 경험에 의존한다. 즉, 같은 종류의 수지라도 제조회사에 따라 기본 물성치가 다르고 정형화된 성형조건 설정방법이 존재하지 않기 때문에 비숙련 작업자가 성형조건을 설정하기는 쉽지 않고 생산공정을 자동화하는 것도 매우

어렵다.

작업자의 노하우나 경험데이터를 기반으로 신경망(neural network), 퍼지(fuzzy), 유전자 알고리즘 등의 기법을 이용하여 성형공정의 제어변수를 최적화하는 방법에 대해서 그동안 많은 연구가 수행되었다(Shelesh, 1997; Lau, 1999). 그렇지만 실제 사출성형에서 활용할 수 있는 시스템에 대한 개발사례는 거의 알려져 있지 않다. 즉, 사출성형에서는 제어변수가 많고, 사출성형기의 제어특성상 설정된 성형조건이 매 사출공정마다 다르게 나타나기 때문에 실제적인 시스템을 개발하기 위해서는 많은 현장실험과 시험운용이 필요하다(Yoo, 1995; Jo, 1995).

본 연구는 금형제조 공장에서 시험사출 과정을 거쳐서 완성된 사출금형, 사용할 수지 및 사출성형기가 결정된 상황에서 작업의 미세한 변동에도 불구하고 계속적으로 양품을 생산할

본 논문은 정보통신부 및 산업자원부 주관의 IMT 2000사업의 “플라스틱 사출성형 IES 기술개발”과제 지원 하에 수행되었음.

[†] 연락처 : 김보현, 330-825 충남 천안시 입장면 흥천리 35-3 한국생산기술연구원 지능형생산정보팀, Fax : 041-5898-420,

E-mail : bhkim@kitech.re.kr

2004년 2월 14일 접수, 2회 수정 후 2004년 12월 8일 게재 확정.

표 1. 불량유형 및 발생원인

| 불량유형 | 발생원인 | 불량유형 | 발생원인 |
|-----------------------|--|------------------------|--|
| 미성형 (short shot) | 금형 캐비티 내에 수지가 완전히 들어차지 못해서 성형제품의 기준치수 및 중량에 미달되는 경우. | 크랙 (crack) | 제품 표면의 응고된 수지와 내부의 용융된 수지 간에 발생하는 수축의 시간 차이에 의해 응력이 발생하여 갈라지거나 깨지는 현상. |
| 플래시 (flash) | 정상상태보다 수지가 많이 유입되어 제품형상 이외의 불필요한 부분이 생성되는 경우로 금형 접합부분, 슬라이드(slide) 부분, 인서트(insert)의 틈새, 이젝터(ejector) 핀의 간격 등의 부위에 나타남. | 웰드라인 (weld line) | 금형설계에 의해 두 갈래 이상의 수지 흐름이 만나는 장소에서 발생하는 선 모양으로 수지 온도 차이에 의해 냉각과정이 동일하게 이루어지지 않아 발생. |
| 싱크마크 (sink mark) | 수지의 냉각과정에서 수축에 의해 성형품의 표면이 오목하게 들어가는 현상으로 제품치수에 영향을 줌. | 박리현상 (delamination) | 성형품이 금형에서 이탈될 때 금형 표면에 수지의 일부분이 떨어져나가는 현상으로 균일해야 할 제품 두께가 불균일하게 발생. |
| 플로마크 (flow mark) | 게이트 주변에서 금형과 수지의 온도차에 의해 응고되어 흐르는 자국이 얼룩무늬처럼 나타나는 현상. | 얼룩 (stain mark) | 제품 표면에 얼룩이 나타나는 현상으로 발생 위치에 따라 다양한 접근방법이 요구됨. |
| 은줄 (silver streak) | 수지가 흐르는 방향으로 기포나 가스가 터지면서 생긴 은백색의 줄 현상. | 뒤틀림, 휨 (warpage) | 수지의 냉각과정에서 제품 표면과 내부 수지의 냉각속도 차이와 위치별 온도 차이에 의해 발생하는 현상. |
| 제팅 (jetting) | 수지가 게이트에 가까운 곳부터 차례로 채워지지 않고, 쭉 뻗어나와 게이트에서 먼 곳을 채운 다음 다시 게이트 주위를 채우는 현상으로 제품 표면에 지렁이가 지나간 것 같은 흔적이 발생함. | 광택 (gloss mark) | 수지 본래의 광택과는 다른 우유 빛 막이 형성되는 현상으로 금형 표면의 연마도가 나빠거나 이형제와 같은 불순물이 수지에 고착되어 발생하는 현상. |

수 있는 안정적인 사출성형조건을 사용자가 쉽게 찾을 수 있도록 지원하는 시스템의 개발에 대한 내용이다. 다음 장에서는 사출성형 공정에서 발생하는 성형품의 불량유형을 파악하고, 사출성형의 제어변수와 불량유형의 상호관계로부터 해결 방안을 도출한다. 이를 활용하여 개발할 사출성형조건 탐색 지원시스템의 내부 로직에 대한 내용이 제 3장에서 기술된다. 제 4장에서는 개발된 지원시스템을 실제 사출성형기에 장착하여 시험 운용한 내용을 기술하도록 한다.

2. 성형품의 불량유형 파악 및 해결방안

본 연구에서 제안한 사출성형조건 탐색 지원시스템은 주어진 생산환경(금형, 수지, 사출성형기, 제품정보) 하에서 불량률이 없는 성형품을 양산할 수 있는 안정적인 성형조건을 빠르고 쉽게 설정할 수 있도록 도와주는 도구이다. 본 장에서는 지원시스템의 개발에 앞서 사출성형에서 나타나는 성형품의 불량유형을 파악하고 이를 해결할 수 있는 방안을 마련하도록 한다. 대부분의 성형품 불량은 작업자의 육안검사로 확인할 수 있지만, 육안검사가 어려운 경우에는 현미경이나 X선 촬영을 이용해서 불량을 판정한다. 사출성형에서 일반적으로 나타나는 불량유형은 <표 1>에 나타난 것처럼 12가지로 요약할 수 있다.

<표 1>에 나타나 있는 불량유형은 서로 간에 상반되는

경우도 있고 밀접한 관계가 있는 경우도 있는데, 성형하는 제품의 형상에 따라 다양한 현상이 나타난다. 일반적으로 미성형과 플래시는 서로 상반되는 불량유형이고, 플로마크와 은줄은 서로 밀접한 관련을 갖는다. 그렇지만 이러한 불량유형 간의 일반적인 관계가 항상 유지되는 것은 아니다. 예를 들어 모레시계와 같은 형상의 성형품에 대해서 위쪽 부분에서부터 수지가 유입되는 경우를 생각해 보자. 가운데 통로의 지름이 아주 작은 경우에는 위쪽 부분에서는 과도한 사출압력에 의해서 플래시 불량이 나타나고 아래쪽 부분에는 충분한 사출압력이 전달되지 않기 때문에 미성형 불량이 나타날 수 있다. 이렇듯 불량유형 간에는 특정한 관계가 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 하나의 성형품에 나타나는 여러 가지 불량유형들 중에서 하나씩 순차적으로 제거하는 방법을 사용하도록 한다.

불량유형 중에서 크랙이나 뒤틀림 등의 불량유형은 수지의 냉각과정에서 발생하는 전단응력의 변화에 대한 성형해석을 통해 해결하기도 하지만(Amit, 2002; Yang, 2002), 모든 불량유형을 실험적인 성형해석을 통해 해결할 수는 없다. 따라서 해석적인 방법을 적용할 수 없는 다른 불량유형에 대해서는 사출성형 공정을 보다 잘 이해하고 있는 숙련된 작업자의 기술 및 경험에 의존할 수밖에 없다.

본 연구에서는 비숙련 작업자도 쉽게 사출성형조건을 설정할 수 있도록 숙련된 작업자의 작업순서 및 경험을 시스템화하고자 한다. 우선 사출성형 공정에서 가장 빈번하게 발생

되고 작업자의 육안검사로 쉽게 확인할 수 있는 미성형, 플래시 및 싱크마크의 세 가지 불량유형을 본 연구의 대상으로 선정하고 향후에 대상 불량유형을 확대하기로 한다. 이러한 세 가지 불량유형의 세분화된 발생원인과 실제 현장에서 사용되고 있는 해결방법을 정리한 내용이 <표 2>에 잘 나타나 있다.

표 2. 제어 대상 불량유형의 세부원인 및 해결방안

| 불량유형 | 발생원인 | 해결방안 |
|------------------|---------------------------|---|
| 미성형 (short shot) | 수지의 금형 내 유입량이 작음 | 사출압력을 높이거나 수지계량 (스트로크)을 늘림 |
| | 수지의 유동성이 낮음 | 수지온도를 올리거나 금형온도를 높임 사출시간이 부족한 경우에는 사출속도를 증가시킴 |
| | 캐비티, 스프루, 런너, 수지의 유동저항이 큼 | 스프루, 런너, 게이트 단면적을 늘리고 유동길이를 감소시키거나 게이트의 위치를 변동하여 수지흐름을 통제 |
| 플래시 (flash) | 수지 충전 과다 | 수지계량을 줄임 |
| | 수지의 유동성이 큼 | 수지, 금형 온도를 낮추고 사출압력과 속도를 낮춤 |
| | 금형의 체결문제 | 금형 내의 이물질 등을 확인하고 금형의 평행도, 다듬질 등을 점검. 또한 금형 체결력을 높이고 사출압력을 높임 |
| 싱크마크 (sink mark) | 수지량의 문제 | 수지계량을 늘리거나 사출압력과 보압을 증가 |
| | 냉각시간 문제 | 금형온도를 낮추고 냉각시간을 늘림 |
| | 수지가 냉각과정에서 부피 변화가 큼 | 수지온도를 낮추고 첨가제를 이용(무기질 재료: 유리섬유 등) |
| | 성형품의 치수 문제 | 리브를 금형설계에 추가하거나 두께 방향의 치수를 줄임 |

수지온도는 수지의 유동성과 밀접한 관련을 갖는 중요한 제어변수이지만, 제어하기가 쉽지 않기 때문에 일반적으로 현장에서는 수지제조업체가 추천한 온도구간(temperature range) 내에서 값을 설정하여 사용한다. 즉, 사출성형기에서 수지온도를 높이는 제어는 가능하지만 온도를 낮추는 제어는 매우 어렵기 때문에, 일반적으로 제조업체가 추천한 온도 구간에서 낮은 값을 설정하여 사용하다가 문제가 발생하면 온도를 높이는 방향으로 적용한다. 그렇지만, 수지온도를 올리는 데도 많은 시간이 소요되기 때문에 본 연구에서의 사출성형조건 제어변수에서는 제외하도록 한다. 또한 금형온도는 금형을 설계할 때 설정되는 값으로 사출성형 공정에서는 설정된 금형온도를 유지하기 위해 노력한다. 따라서

본 연구에서는 사출성형기에서 제어가 가능하고 응답성이 좋은 속도 프로파일(사출속도, 보압속도), 압력 프로파일(사출압력, 보압압력), 스크루의 스트로크를 제어변수로 선택하였다.

성형조건을 전체적으로 통제하기 위해서는 우선 선택된 제어변수 중에서 사출성형 과정에 미치는 영향의 정도에 따라 우선순위를 결정할 필요가 있다. 이를 위해서 사출성형 과정에서 생성된 성형품들의 중량변화를 관찰하였으며, 비교적 일정한 두께를 갖는 도광판 금형을 이용하여 실험하였다. 양품이 성형될 때의 공정 제어변수 값을 기준(100%)으로 80%, 60%의 상대적인 비율로 제어변수의 변화량을 설정하고, 독립적으로 제어변수 값을 변화시키면서 생산되는 성형품의 중량을 살펴보았다. <표 3>에 나타나 있듯이, 사출압력과 스크루의 스트로크가 성형품의 중량 및 수지의 유입량에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

표 3. 제어변수의 변화에 따른 중량의 변동

| 제어변수의 변화 | | 사출속도 (=보압속도) | 사출압력 | 보압압력 | 스트로크 |
|-----------|----------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 100% (양품) | 변수값 | 21.0% | 94.0bar | 56.0bar | 25.80mm |
| | 중량 (변화율) | 29.84g (0.0%) | 29.84g (0.0%) | 29.84g (0.0%) | 29.84g (0.0%) |
| 80% | 변수값 | 16.8% | 75.2bar | 44.8bar | 20.64mm |
| | 중량 (변화율) | 29.76g (-0.3%) | 26.37g (-11.6%) | 29.64g (-0.7%) | 27.38g (-8.2%) |
| 60% | 변수값 | 12.6% | 56.4bar | 33.6% | 15.48mm |
| | 중량 (변화율) | 27.49g (-7.9%) | 15.22g (-49.0%) | 29.52g (-1.1%) | 21.49g (-28.0%) |

3. 사출성형조건의 탐색절차

사출성형조건의 탐색 지원시스템을 설계하기 위해서 우선 숙련된 작업자의 성형조건 설정업무를 파악하였다 (<그림 1>). 업무흐름은 크게 세 단계로 구성되는데, 첫 번째 시작 성형조건 설정단계는 제품, 수지, 금형 및 기계 정보로부터 사출성형의 시작 성형조건을 계산하는 과정이다. 두 번째 초기 성형조건 설정단계는 시작 성형조건으로부터 성형조건을 개선하여 불량이 없는 양품을 처음으로 얻을 때까지의 과정이다. 마지막 안정적인 성형조건의 설정단계는 기계동작이나 작업상의 미세한 변동에도 지속적으로 양품이 생성될 수 있는 안정적인 성형조건을 초기 성형조건으로부터 탐색하는 과정이다.

본 연구는 작업자를 보조하는 지원시스템을 개발하는 것이기 때문에 사용자의 피드백(feedback) 정보를 잘 활용할 수 있도록 시스템을 설계한다. 또한 이러한 성형조건 설정과정

은 로그파일 형태로 저장할 수 있도록 하여 유사한 제품의 사출성형 시에 재활용할 수 있도록 한다.

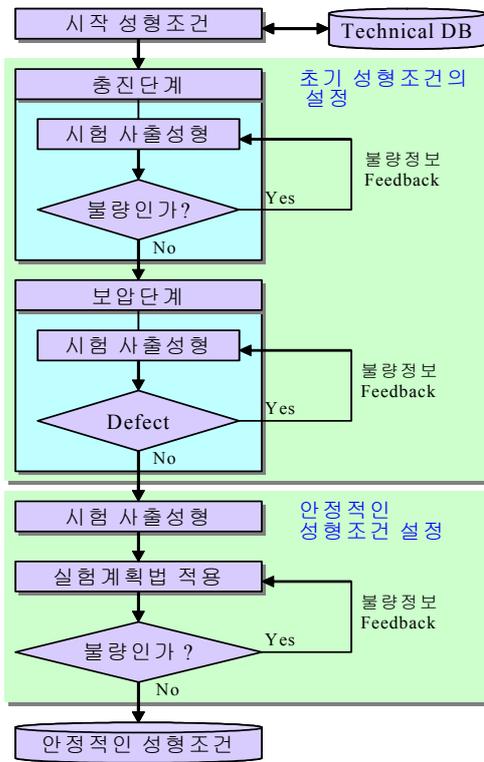


그림 1. 사출성형조건 탐색업무 흐름도.

3.1 시작 성형조건의 설정 로직

시작 성형조건 설정단계에서는 수치, 사출성형기 및 제품 정보를 입력하여 시작 성형조건을 산출하도록 로직을 설계하였다. 여기서 수치는 제품의 용도와 크기, 부피, 두께 등의 제품 형상정보를 고려하여 결정하는 것이 일반적이다. <표 4>에는 사출성형에서 자주 사용되는 수치에 대한 가열실린더의 표준온도, 스크루 회전, 배압압력 및 금형온도가 나타나 있다. 본 연구에서는 <표 4>에 나타나 있는 수치 중의 한 개를 사용자가 선택하면 자동으로 사출성형기의 가열 실린더와 스크루 구동장치를 제어하도록 설계하였다. 또한 새로운 수치를 사용하는 경우에는 <표 4>에 나타나 있는 정보를 입력하여 추후에 사용할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 개발된 시스템은 사출성형기로부터 직접 기계 스펙 정보를 입력받을 수 있도록 인터페이스를 설계하고 구현시켰다. 여기서 사출성형기 정보를 활용하여 시험사출을 위해서 설정되는 제어변수 값이 사출성형기의 최대 성능을 넘지 않도록 설정함으로써 사출성형 공정의 안전성을 보장한다. 본 연구에서 사용한 사출성형기는 우진세렉스의 MS-120 모델로 무부하시 최대 사출압력 120bar, 최대 사출속도 250mm/sec를 갖는다. 일반적으로 사출성형기에서는 사출압력, 사출시간, 사출거

리의 세 가지 요소 중 하나를 기준으로 보압단계로의 전환 시기를 설정하는데, 본 연구에서는 사출거리(스크루 위치)를 기준으로 보압절환이 이루어지도록 시스템을 설계하였다.

표 4. 소재에 따른 공정 제어변수 값의 범위

| 수지 | 사출성형기의 가열 실린더 온도 (°C) | | | | 스크루 RPM | 배압 압력 (kg/cm ²) | 금형 온도 | |
|---------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------|-------|--------|
| | H1 | H2 | H3 | 노즐 | | | | |
| C r y s t a l | PE | 140~250 | 160~250 | 180~290 | 190~290 | 0~180 | 3~30 | 10~70 |
| | PP | 150~290 | 190~310 | 190~310 | 190~310 | 0~180 | 3~30 | 15~80 |
| | PA6 | 190~230 | 210~240 | 230~260 | 220~260 | 0~110 | 3~20 | 20~90 |
| | PA66 | 250~280 | 260~290 | 270~300 | 270~300 | 0~110 | 3~20 | 20~90 |
| | POM | 160~200 | 170~210 | 150~220 | 150~220 | 0~90 | 2~20 | 40~100 |
| N o n | PS | 160~250 | 170~270 | 160~270 | 180~280 | 0~180 | 5~20 | 10~65 |
| | PVC(soft) | 125~200 | 160~210 | 170~220 | 160~220 | 0~70 | 5~20 | 50~80 |
| | PVC(hard) | 140~200 | 150~210 | 160~220 | 160~220 | 0~70 | 3~15 | 40~60 |
| a m o r | ABS | 180~240 | 190~240 | 190~240 | 180~240 | 0~110 | 5~20 | 40~80 |
| | PMMA | 170~240 | 170~250 | 180~260 | 190~260 | 0~70 | 3~20 | 40~100 |
| | PC | 230~300 | 240~330 | 270~340 | 270~340 | 0~90 | 3~30 | 70~120 |
| | AS | 150~230 | 180~220 | 190~260 | 190~260 | 0~110 | 5~20 | 30~80 |

사출성형의 시작 성형조건(스트로크, 사출압력, 사출속도, 보압 및 보압시간, 사출시간, 냉각시간 등)을 계산하기 위해서는 금형 캐비티 내의 부피를 알 수 있어야 한다. 제품이나 금형의 3차원 CAD 데이터가 가용한 경우에는 비교적 정확하게 금형 캐비티 내의 부피를 계산할 수 있지만, 그렇지 않은 경우에는 근사적인 방법으로 부피를 산정하도록 한다. 사출성형조건에서 사출속도와 사출시간은 서로 밀접한 상관관계를 갖고 있는데, 일정한 양의 수지를 금형 캐비티에 충전할 때 사출속도가 증가하면 사출시간이 감소하고 사출시간이 증가하면 사출속도는 감소하게 된다. 본 연구에서는 최초로 설정된 사출압력과 사출속도로 스크루가 보압절환 위치까지 이동할 때의 시간을 사출시간으로 설정한다. 또한 사출성형 공정분야에서 일반적으로 잘 알려져 있는 다음의 수식을 이용하여 시작 성형조건을 계산한다(KITECH, 2001).

$$\text{스크루의 스트로크}(L) = \frac{Volume}{\pi(d_s/2)^2} \quad (1)$$

여기서, $Volume$ = 금형 캐비티 내의 부피(혹은 제품의 부피)

d_s = 스크루의 지름

$$\text{사출압력}(P) = C_f \times l_t \times l_{max} \quad (2)$$

여기서,

C_f = 수지의 유동계수

l_t = 제품의 두께

l_{max} = 최대 유동거리로 게이트에서 제품의 가장 먼 곳까지의 거리

$$\text{사출속도 } (V) = \frac{\text{Volume}}{\pi \times (d_s/2)^2 \times t} = L/t \quad (3)$$

여기서, t = 수지의 충전시간

$$\text{냉각온도 } (T_{cool}) = \frac{l_t^2}{\pi^2 \times C_h} \ln\left(\frac{4}{\pi} \times \frac{T_r - T_m}{T_e - T_m}\right) \quad (4)$$

여기서, C_h = 유효 열확산도

T_r = 수지온도

T_e = 이젝팅 온도

T_m = 금형온도

<표 5>에는 사출압력을 계산할 때 사용되는 수지의 유동 계수가 나타나 있는데, 값이 작을수록 용융상태에서 묽고 유동성이 좋은 것을 의미한다. 계산된 사출압력은 사출성형기의 유압에 의해 발생하는 압력을 나타내는 것으로, 실제로 금형 캐비티 내부로 전달되는 압력과는 차이가 있다. 즉, 사출성형기에서 발생하는 사출압력이 러너 및 게이트를 통해

서 금형 캐비티 내부로 전달되기 때문에 금형 캐비티 내부에는 설정된 사출압력보다 작은 압력이 작용된다.

숙련된 작업자의 경우 통상적으로 사출압력의 80%를 보압압력으로 설정하는데, 본 시스템에서도 동일한 방법으로 보압압력을 설정하도록 한다. 보압시간은 5초로 설정하고 제품의 형상정보 및 불량정보에 따라 변화를 주도록 한다.

표 5. 수지의 유동성 계수

| 수지 | 유동성 계수 | 수지 | 유동성 계수 |
|----------|--------|--------|--------|
| ABS | 2.0 | PES | 3.7 |
| PE | 1.8 | PMMA | 1.6 |
| PAG | 2.0 | POM | 2.4 |
| PA6.6+GF | 2.4 | PP | 1.2 |
| PBTP | 2.0 | PPO | 1.9 |
| PBTP+GF | 2.3 | PPO+GF | 3.2 |
| PC | 3.3 | PS | 1.2 |
| PC+GF | 3.7 | SAN | 1.8 |

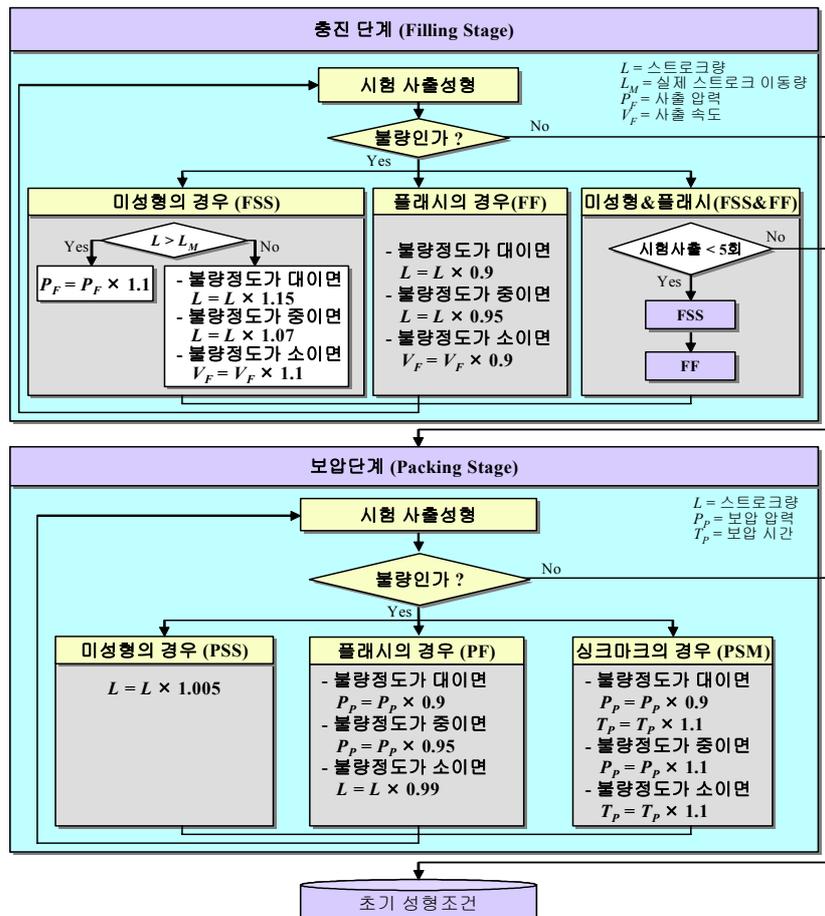


그림 2. 초기 성형조건의 탐색절차.

3.2 초기 성형조건의 탐색절차

사출성형은 크게 용융된 수지에 압력을 가하면서 금형 캐비티 내부로 밀어 넣는 충전단계와 냉각과정에서 수지의 수축으로 인한 부피의 감소를 보충하기 위해서 추가적으로 수지를 유입하여 보정하는 보압단계로 구분한다. 본 연구에서 제안하는 초기 성형조건의 탐색절차는 <그림 2>에 나타난 것과 같이 충전단계 및 보압단계의 순차적인 성형과정을 거치면서 대상 불량률에 해결하는 방법이다.

압력을 가하면서 용융 수지를 금형 캐비티 내부에 채우는 충전단계에서는 대상 불량유형 중에서 미성형과 플래시만 나타난다. 계산된 시작 성형조건의 사출압력은 러너 및 게이트 등을 고려하지 않았기 때문에 실제 금형 캐비티 내부에는 충분한 압력이 전달되지 못해서 미성형 불량을 유발시킬 수 있다.

이러한 미성형 문제를 해결하기 위해서 압력을 증가시킬 경우에는 반대로 플래시 불량이 나타나게 된다. 본 연구에서는 시작 성형조건의 사출압력을 조금씩 증가시키면서 미성형 불량을 해결하고, 이 과정 중에 나타나는 플래시 불량을 해결하는 방향으로 로직을 설정한다. 설정된 성형조건으로 시험사출한 다음, 성형품의 불량유형 판정은 사용자의 육안검사에 의해 이루어진다.

충진단계를 거치면서 미성형과 플래시 불량이 어느 정도 제거된다고 가정하면, 보압단계에서는 수지수축이 주요 원인인 싱크마크 불량을 추가적으로 고려한다. 여기서도 불량유형의 판정은 작업자의 육안검사에 의해 이루어지는데, 미성형은 스크류의 스트로크를 조절하고, 플래시는 싱크마크 불량상황을 고려하면서 보압을 조절하고, 싱크마크는 불량 정도에 따라 보압압력과 보압시간을 조절한다.

초기 성형조건 설정로직에서 제어변수 값을 갱신하는 데는 불량유형 및 불량률의 크기 정보를 이용하여 실험적으로 변화량 값을 설정한다. <그림 2>에 나타나 있는 변화량 값은 도광판, 핸드폰 케이스 등과 같은 소형 제품에 대해서 실험적으로 얻은 값이다.

3.3 안정적인 성형조건의 탐색절차

이 단계에서는 사출성형기나 운영상의 미세한 성형조건의 변동에도 안정적으로 양품을 성형할 수 있는 안정적인 성형조건을 탐색하는 것이 목적이기 때문에 초기 성형조건의 설정단계처럼 제어변수 값을 한번에 많이 변화시키는 것은 바람직하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 성형조건에 가장 크게 영향을 미쳤던 사출압력을 제외한 나머지 제어변수들을 이용하여 이 단계에서의 성형조건을 개선하도록 한다. 이러한 아이디어를 바탕으로 스트로크, 사출속도, 보압압력의 세 가지 제어변수를 활용한 실험계획법을 적용

하였다.

선택된 세 가지 제어변수들을 2수준으로 설정하면 총 8가지의 성형조건을 계산할 수 있다. 각 성형조건에 대해서 실험사출을 수행하고, 성형품의 불량 유무 정보를 이용하여 현재 성형조건에서의 개선 방향을 결정한다. 사출속도, 보압압력, 스트로크로 구성된 가상의 3축 성형조건 공간상에서 현재의 성형조건은 한점에 해당된다.

실험계획에 의해서 설정된 8개의 성형조건으로부터 현재 성형조건이 중심인 육면체(cubic) 형태의 탐색범위를 결정할 수 있다. 여기서 8개의 실험사출 결과를 이용하여 성형조건의 개선방향 및 성형조건의 변화량을 결정한다. 만약 8개의 실험사출에서 불량률이 발생하지 않은 경우에는 탐색범위(조정인자: 델타, δ)를 넓혀서 다시 실험사출을 하도록 한다.

본 연구에서는 성형조건의 개선방향을 결정하는 데 있어서, <그림 3>에 나타난 것과 같이 불량을 회피하는 방향으로 이동하는 방법(방법 1)과 불량을 제거하는 방향으로 이동하는 방법(방법 2)을 적용하였다. 첫 번째 불량회피 방법은 우선 현재의 성형조건과 실험계획에 의해 생성된 8개의 성형조건으로부터 단위 방향벡터들을 설정한다. 각 성형조건의 성형품이 불량일 경우에는 “0”의 가중치를 양호할 경우에는 “1”의 가중치를 부여한다. 가중치가 “1”인 방향벡터들의 합으로부터 성형조건의 개선 방향을 산출한다.

이 방법은 불량률의 유무만을 따지기 때문에 대상 불량유형(미성형, 플래시, 싱크마크)에 대해서 직접적으로 대응할 수 없고 안정적인 성형조건으로의 수렴속도가 느리다는 단점이 있다. 반면에, 불량유형이 추가되더라도 쉽게 확장할 수 있고 사출성형 공정과 유사한 형태의 다른 생산 공정에도 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.

두 번째 불량제거 방법은 대상 불량유형(미성형, 플래시, 싱크마크)에 대한 원인을 제거할 수 있는 해당 제어변수 및 해당 수준을 결정하고, 8개의 성형조건 중에서 여기에 관련된 성형조건들만을 선택한다. 선택된 성형조건의 방향벡터들을 합해서 다음 성형조건의 개선방향을 계산한다.

예를 들어 8개의 시험사출에서 미성형 및 플래시가 발생했다고 가정하면, 미성형을 제거하기 위해서는 스트로크를 증가시켜야 하기 때문에 스트로크가 큰 성형조건들을 추출해서 집합으로 만든다. 또한 플래시를 제거하기 위해서 사출속도가 작게 설정된 성형조건들을 추출해서 집합으로 만든다. 추출된 두 성형조건의 집합에서 교집합에 해당되는 성형조건들의 방향벡터를 합하여 다음 성형조건의 개선방향을 결정한다. 이 방법은 사출현장에서 작업자들이 경험적으로 수행하는 불량해결방법(<표 1>에 정리된 내용)을 체계화한 것이다. 이 방법은 첫 번째 방법에 비해 안정적인 성형조건에 수렴하는 속도가 빠르고 원인을 직접적으로 제거하기 때문에 불량률에 대한 해결능력은 우수하지만, 불량유형을 추가하는 경우에 로직을 쉽게 확장할 수 없다는 단점을 가지고 있다.



사출 성형기

성형조건설정시스템

그림 4. 사출기에 장착된 지원시스템의 개념.

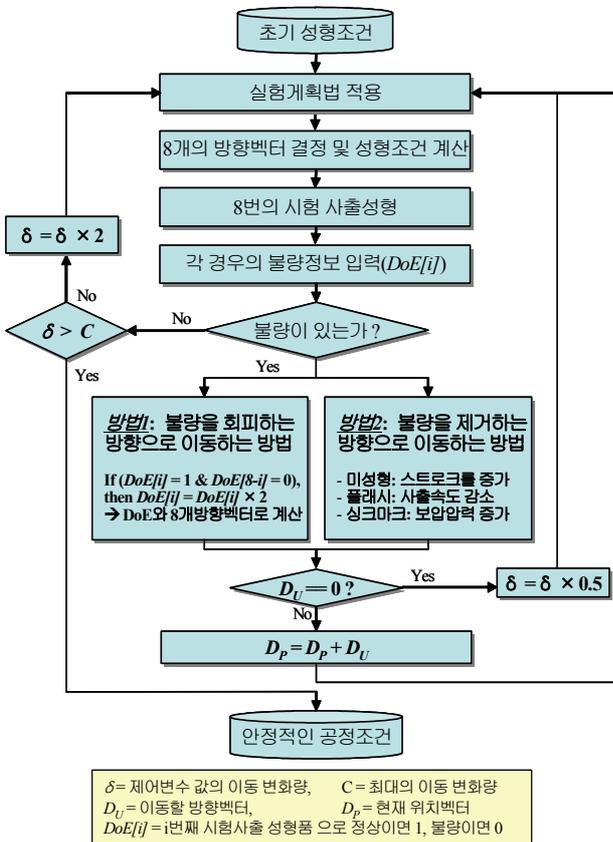


그림 3. 안정적인 성형조건의 탐색절차.

4. 시스템 구현 및 적용

본 연구에서 개발된 사출성형 성형조건 설정 지원시스템을 사출성형기에 장착하여 통합적으로 운영하기 위해서는 인터페이스, 모니터링, 실시간 통신 및 제어기능을 담당할

사출성형기의 운영프로그램의 개발이 필요하다. 기존의 사출성형기 운영 프로그램에 CANopen 통신방식을 활용한 제어기능을 추가로 개발해서 통합적으로 운용될 수 있는 지원시스템을 구축한 내용이 <그림 4>에 잘 나타나 있다.

개발된 시스템의 타당성을 검증하기 위해서 밀폐용기 덮개 개용 금형을 대상으로 성형조건을 탐색하는 실험을 수행하였다. <그림 5>에는 시작 성형조건에서 출발하여 총 4회의 성형조건 수정을 거쳐서 최초로 생성된 양품에 대한 이미지가 나타나 있다. 이때 시험 사출에 사용된 수지는 PP(poly propylene)로 Samsung Atofina에서 생산된 제품이다.



그림 5. 시험사출에서 생성된 밀폐용기 덮개 성형품의 예제.

<표 6>에는 양품을 생성하는 과정에서 발생한 불량유형과 제어변수의 변화량이 나타나 있는데, 사출압력을 낮게 설정한 1차 시험사출(충진단계)에서 플래시가 발생하지 않고 미성형이 발생하도록 유도한 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 4회의 시험사출만으로 양품을 생성했는데, 이것으로부터 개발된 시스템을 실제 현업에도 충분히 적용할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

표 6. 초기 성형조건을 설정하는 과정 요약

| 반복횟수 | 나타난 불량유형 | 제어변수 | 변화량 |
|------|----------|------|-------|
| 1 | 미성형 | 스트로크 | 15% ↑ |
| 2 | 미성형 | 스트로크 | 15% ↑ |
| 3 | 미성형 | 스트로크 | 15% ↑ |
| 4 | 싱크마크 | 보압압력 | 10% ↑ |

개발된 시스템을 활용하여 안정적인 성형조건을 설정하는 과정이 <표 7>에 잘 나타나 있는데, 불량을 회피하는 방법(방법1)보다 불량을 제거하는 방법(방법2)의 수렴속도가 더 빠른 것을 알 수 있다. 그렇지만 탐색된 안정적인 성형조건의 안정화범위(stable range: 현재 성형조건에서 양품을 성형할 수 있는 각 제어변수의 범위)에 있어서는 방법1이 더 우수한 것으로 나타났다(<표 8>). 또한 시험사출 과정에서 방법1은 대상 불량유형인 미성형, 플래시, 싱크마크 이외의 뒤틀림 불량까지 해결할 수 있었다.

표 7. 안정적인 성형조건을 설정하는 과정 요약

| 방법 | 반복 횟수 | 실험계획법에 의한 8개의 성형조건 | | | | | | | | 사출 속도 (%) | 보압 압력 (Bar) | 스트로크 (mm) |
|----|-------|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|-----------|-------------|-----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | |
| 1 | 1 | ND | SM | ND | SM | ND | SM | ND | SM | 80.0 | 61.5 | 51.0 |
| | 2 | ND | B | SM | B | SM | B | SM | B | 82.9 | 63.2 | 52.1 |
| | 3 | ND | B | SM | B | SM | B | SM | B | 85.9 | 65.0 | 53.1 |
| | 4 | ND | B | ND | B | ND | B | ND | B | 85.9 | 65.0 | 55.8 |
| | 5 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | 85.9 | 65.0 | 55.8 |
| | 6 | ND | B | ND | B | ND | B | ND | B | 85.9 | 65.0 | 61.5 |
| | 7 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | 85.9 | 65.0 | 61.5 |
| | 8 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | 85.9 | 65.0 | 61.5 |
| 2 | 1 | ND | SM | ND | SM | ND | SM | ND | SS | 80.0 | 64.0 | 50.0 |
| | 2 | ND | B | ND | SM | ND | B | ND | B | 80.0 | 67.2 | 50.0 |
| | 3 | ND | B | ND | B | ND | B | ND | B | 80.0 | 67.2 | 50.0 |

ND: 불량 없음, SM: 싱크마크, SS: 미성형, B: 뒤틀림

표 8. 방법1과 2의 안정화 범위

| 방법 | 반복수 | 안정화 범위 | | | | |
|----|-----|--------|------|------|------|------|
| | | 사출속도 | 보압압력 | 스트로크 | 보압시간 | 냉각시간 |
| 1 | 4회 | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% |
| 2 | 3회 | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% |

5. 결론 및 추후 연구

본 연구에서는 숙련된 작업자의 경험 및 작업과정을 분석하고, 성형조건 탐색업무를 정형화하고 지원시스템으로 개발하였다. 그리고 이러한 지원시스템을 사출성형기에 장착하여 통합

적으로 운용할 수 있도록 하였으며, 실제 실험을 통해서 개발된 지원시스템의 타당성을 입증하였다. 특히, 개발된 지원시스템은 성형조건 설정업무 과정을 로그파일 형태로 저장할 수 있기 때문에 유사한 제품의 성형조건을 설정할 때 효과적으로 활용할 수 있으며 작업시간도 단축할 수 있다. 또한 작업자는 현재의 업무순서대로 시스템을 활용하여 성형조건을 탐색할 수 있으며, 비숙련 작업자라도 별도의 사용교육 없이도 쉽게 시스템을 사용할 수 있도록 개발하였다.

본 연구에서 제안한 알고리즘의 개선을 위해서는 각 유형별 불량해결 방안이 다른 불량에 미치는 영향과 이를 최소화하면서 효율적으로 불량을 제거하는 방법에 대한 체계적인 연구가 수행되어야 한다. 또한 개발된 시스템이 현장에서 잘 적용되기 위해서는 서론에서도 기술했듯이 대상 불량유형을 추가해야 한다. 즉, 플로마크, 은줄 등과 같은 추가적인 불량유형을 해결할 수 있도록 시스템의 내부 로직을 확장하고 보완하는 연구를 수행해야 한다. 더불어 안정적인 성형조건을 설정단계에서 성형조건 개선방법을 추가적으로 개발하고, 사출성형 공정상황에 맞게 적절한 방법을 자동으로 선택할 수 있는 시스템으로 발전시킬 필요가 있다

참고문헌

Shelesh-Nezhad, K. and Siores, E.(1997), An Intelligent System for Plastic Injection Molding Process Design, *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 458-462.

Lau, H.C.W., Wong, T. T., Pun, K. F.(1999), Neural-Fuzzy Modeling of Plastic Injection Molding Machine for Intelligent Control, *Expert Systems with Applications*, 17, 33-43.

Kenig, S., Ben-David, A., Omer, M., and Sadeh, A.(2001), Control of Properties in Injection Molding by Neural Networks, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14, 819-823.

Bozdana A. Tolga and Eyercioglu. Omer(2002), Development of an Expert System for the Determination of Injection Molding Parameters of Thermoplastic Materials : EX-PIMM, *Journal of Materials Processing Technology*, 128, 113-122.

Kang, I. H., Cho, Y. S., and Park, H. S.(2001), Study on Image Processing Technique for Injection of Injected E.V.A Midsole, *Journal of The Korean Society of Precision Engineering*, Fall Conferences, 269-272.

Yoo, Joong-Hak and Kim, Hei-song(1995), The Effects of Injection Molding Conditions of Polypropylene on the Linear Shrinkage and Weight of molded Parts, *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, 19(2), 322-329.

Jo, Y. M., Kwon, O. J., Yoo, Y. J., and Kim, J. D.(1995), A Study of Estimation of Filling Phase Condition in Injection Molding Process, *Journal of The Korean Society of Precision Engineering*, 12(3), 110-118.

Kang, S. N., Huh, Y. J., and Cho, H. C.(2001), A Study on Intelligent Generator of Optimal Process Condition to Avoid Short Shot, *Journal of The Korean Society of Precision Engineering*, Spring Conferences, 402-405.

Kim, B. G., and Min, B. H.(2001), A Study of Warpage of Bobbin Molded by Injection Molding Process, *Journal of The Korean Society of Precision Engineering*, Spring Conferences, 811-814.

Kim, Jong-Hun., Lee, Jong-Soo., and Cha, Sung-Woon.(2003), The

Optimization of Injection Molding System Using Axiomatic Approach, *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, 27(6), 1020-1027.
 Kumar, Amit, Ghoshdastidar, P. S., and Muju., M. K.(2002), Computer Simulation of Transport Processes during Injection Mold Filling and Optimization of the Molding Condition, *Journal of Materials Processing Technology*, 120, 438-449.
 Yokoi, H., Masuda, N., and Hitsuhata, H.(2002), Visualization Analysis of Flow Front Behavior during Filling Process of Injection Mold Cavity by Two Axis Tracking System, *Journal of MaterialsProcessing Technology*, 130, 328-333.

Yang, Sang-Sik. and Kwon, Tai-Hun(2002), Deformation Analysis of Injection Molded Articles due to In-mold Residual Stress and Subsequent Cooling after Ejection, *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, 26(2), 340-348.
 Kim, Jong-Sun and Yoon, Kyung-Hwan(2003), A Study on the Prediction of Thermally-Induced Residual Stress and Birefringence in Quenched Polystyrene Plate Including Free Volume Theory, *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers*, 27(1), 77-87.KITECH, Technology of Injection Molding, 2001



김 보 현

전남대학교 산업공학과 학사
 한국과학기술원 산업공학과 석사
 한국과학기술원 산업공학과 박사
 해양시스템안전연구소 선임연구원
 현재: 생산기술연구원 선임연구원
 관심분야: 제조정보시스템, 가상제조시스템 (VMS), CAD/CAM



이 일 량

한양대학교 기계공학과 학사
 한양대학교 정밀기계공학과 석사
 현재: 한국생산기술연구원 연구원
 관심분야: 사출성형/금형, RP/RE, 생산시스템



백 재 용

경희대학교 기계공학과 학사
 경희대학교 기계공학과 석사
 현재: 한국생산기술연구원 연구원
 관심분야: 사출성형/금형, 생산시스템, DMS