

림성형 공정의 기포에 관한 연구

양화준*, 강대원, 강영중, 김성준, 장태석, 이일엽(현대자동차)

A Study on Bubbles in The RIM Process

H. J. Yang, D. W. Kang, Y. J. Kang, S. J. Kim, T. S. Jang, I. Y. Lee(Hyundai Motor Company)

ABSTRACT

To shorten the delivery time for new products, a lot of prototype plastic parts manufacturing technologies have been developed including injection molding, vacuum casting, thermal forming and so on. Among them, RIM is becoming one of a important soft tooling methods to produce prototype and mass production parts within short time. Further more, as the rapid prototyping technology based tooling methods are playing an important role in prototype manufacturing industry, the utility of the RIM is increasing. But few analyses and mold design techniques have been developed so far due to its chemical and mechanical complexity during the packing and curing process.

This research suggests mold gate design criteria to prevent bobbles from molded parts through simplified mathematical model and change of bubble sizes according to the geometry of the molded parts through experiments. Also this study shows the differences of bobble generation mechanism between RIM and injection molding.

Key Words . RIM(림), Bubble(기포), Mold Gate(몰드 주입구), Laminar Flow(층류), Injection Molding(사출성형)

1. 서론

산업구조가 고도화 되고 상품을 구매하는 고객의 기호가 다양해 짐에 따라, 제품을 개발하는 제조업자는 좀더 빨리 자신의 제품을 시장에 출시 하려는 경향을 갖게 되었고, 이의 영향으로 제품 출시전 디자인, 설계상의 성능 및 기능을 검증하는 시제품 제작 방법에 많은 관심을 기울이게 되었다.

플라스틱 제품을 제작하기 위해, 자동차 및 기타 산업에서 일반적으로 사용되는 제작방법은 사출 성형법이다. 사출 성형법에 의해 개발된 부품의 경우 기계적 강도, 내화학성, 외관 측면에서 우수하고 최종 출시 제품과 동일한 기계적 특성을 가지게 되어 제품 개발과정에서의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 그러나 양산 제품과 동일한 물리적 성질의 준수가 요구되지 않고 부품 제작 수량이 비교적 적은 일부 시작용 플라스틱 제품의 경우에는, 설계된 부품을 신속하고 저렴하게 제작할 수 있는 제작방법의 활용이 요구된다.

본 연구에서는 최근 시작용 플라스틱 부품의 제작을 위해 국내외에서 활발히 연구중인 림(RIM: Reaction Injection molding) 성형법에 있어서, 가장 중요한 인자

인 성형품의 기포 발생 경향을 사출성형 모델의 수치상사와 시현된 제작 결과를 이용하여 도출하고, 안정적인 품질확보를 위한 몰드 설계방안을 제시한다.

2. RIM 성형 개요

림 성형은 주재인 폴리올(Polyol)과 경화제인 MDI(4-4 Dimethylmethane Di Isocyanate)가 혼합 후 발생하는 비가역 화학반응에 의해 경화되는 성질을 이용한 것으로, 반응사출성형 등으로 일컬어지기도 한다. 성형에 이용되는 각 소재는 별도의 공급(feed)탱크에서 보관되다가 성형공정에서 혼합실(mixing chamber) 전단의 계량장치(metering system)에서 정확한 비율로 계량되어 혼합된 후 몰드 내부로 유입된다. 폐속조형품의 가장 일반적인 이용 방법으로 사용되는 진공주형법의 한 종류인 자동형 진공주형법(Vacuum Casting)과는 공정상 유사한 점이 많지만 성형 과정에서 몰드를 진공조에 넣지않고 성형한다는 점과 그에 따른 제반 제작 및 성형 공정, 그리고 공법 특성에 적합하도록 개발된 성형 수지에 특성에 의한 성형사이클 등에서 다소간 차이가 있다.

3. 주입구 설계 방법

림 성형 부품에 있어서 가장 치명적인 결함 요인은 성형 과정에서 제품내부에 발생하는 기포이다. 림 성형품의 기포는 제품의 미성형에 따른 외관상의 문제뿐만 아니라 외력이 작용할 경우 성형품 단면형상의 급격한 변화로 인한 응력 집중을 야기하여 제품의 내구성을 저하시키는 요인이 되기도 한다. 그리고 그 발생은 성형 소재특성, 주입구 및 오버플로우 등의 몰드 구조, 성형 공정에서의 주입압력 및 몰드 경사 각도 등 몰드의 설계 및 제작, 성형 등 다양한 요소에 기인한다.

시작용 의장 부품 제작을 위해 사용하는 저압 림 방식은 수지 공급 탱크에서 토출된 두 종류의 성형소재를 혼합실에서 효과적으로 혼합하기 위해 교반기(mixer)를 이용하며, 이 때 수지는 입자유동의 자유도가 높은 난류(turbulence flow)상태가 된다. 한편 주입구를 통해 몰드 내부의 캐비티로 유입되는 수지는 층류(lam.nar flow)의 형태로 몰드 내부로 충전될 때 양질의 제품을 얻을 수 있는데, 그 이유는 난류상태의 액체의 경우 기포를 내재하고 있으므로 성형 제품에 기포를 발생시키고, 성형 초기 수지와의 비중 차이에 의해 상층으로 움직이려는 특성을 가지고 있으므로 제품 상단에 위치한 보스 및 리브에 결함을 초래하여 조립성 문제를 야기시키기 때문이다. 일반적으로 주입구는 숙련된 기술자의 경험에 의존 하는데 일의적 판단에 의해 설계된 몰드는 제품의 품질을 저하시키는 요인이 된다. 다양한 형상과 크기의 제품을 안정적으로 제작하기 위해 유체유동을 이용한 다음의 설계방안을 제시한다.

앞서 언급한 성형 과정에서 진공주조를 사용하는 이외에 RIM 성형이 진공주형과 구별되는 또 하나의 차이는 사용되는 소재의 경화 특성이다. 제품의 크기에 따른 차이가 있으나 일반적으로 주입구, 오버플로우, 수지가 몰드 내부를 흐르는 유로인 런너(runner) 등을 포함한 전체 수지 주입량은 성형제품의 130~150% 정도이므로, 전체 성형수지를 진공주형 보다 빠른 가사시간 이내에 성형하기 위해서 성형기 토출량이 일정하고, 주입구 내부 모든 부위에서의 속도가 동일하다고 가정 경우 다음과 같은 방정식이 성립된다.

$$m = \rho \cdot l \cdot h \cdot v \cdot t \quad 3-1$$

여기서 m 은 제품성형에 필요한 총 수지 질량이며, ρ 는 비중, h 와 l 은 각각 주입구의 높이와 폭, v 는 주입구에서의 성형 수지 이동속도, 그리고 t 는 소재 주입시간이다. 한편 주입시간은 수지가 충분한 유동성을 확보하여 충전이 진행될 수 있는 가사시간(gel time) 보다 짧아야 한다. 가사시간은 수지 점도가 성형과정이 진행됨에 따라 일어나는 발열반응에 따라 감소되었다가

일정시간 이후 주재와 경화제의 화학반응에 의해 급속히 증가되어 초기 점도의 2배가 되는 시점으로 경의된다. 가사시간 이후로는 소재의 원활한 유동이 어려우므로 몰드 내부 캐비티 충전이 불가능하다.

주입구를 지나는 수지 흐름은 평판유동 하에서의 유동과 유사하고, 이때의 입체 레이놀즈(Reynolds) 수는 1000 이므로 층류흐름이 되려면 다음과 같은 부등식이 성립된다.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot h}{\mu} \leq 1000 \quad 3-2$$

여기서 μ 는 점도를 나타낸다

따라서 3-1 과 3-2를 조합하면 가사시간 이내에 성형소재를 층류형태로 주입구를 통해 몰드로 유입시키기 위한 아래와 같은 부등식을 얻을 수 있다

$$\frac{m}{\rho \cdot l \cdot t_c} \leq h \cdot v \leq \frac{1000 \cdot \mu}{\rho} \quad 3-3$$

여기에 성형 수지 제조사에서 제공하는 t_c 로 표현되는 공칭 가사시간의 개념을 도입하면, 성형과정에서의 분위기 온도, 몰드 온도 등을 고려할 때, 성형을 위한 총 수지 주입시간이 공칭가사시간보다는 짧아야 하므로 다음과 같은 부등식이 성립한다

$$\frac{m}{\rho \cdot l \cdot t_c} \leq \frac{m}{\rho \cdot l \cdot t} \leq h \cdot v \leq \frac{1000 \cdot \mu}{\rho} \quad 3-4$$

따라서 수지 주입구의 폭을 적절히 조절하여 주입된 소재가 몰드로 유입되는 속도를 적절히 유지하고, 적정한 높이로 주입구를 제작하는 것이 중요하다. 이러한 개념을 Fig. 1에 나타내었다.

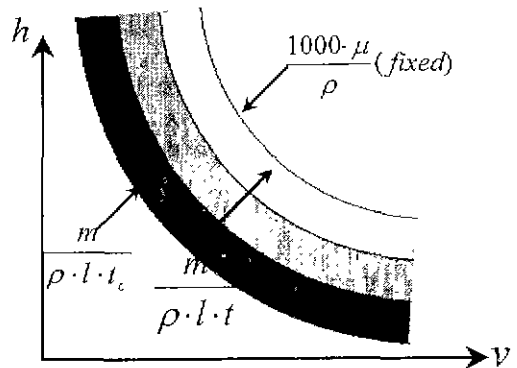


Fig. 1 Mold gate factors design area for RIM process.

4. 림 성형품의 기포발생 경향

림 성형은 사출 성형에 비해 비교적 저압 조건에서 성형이 이루어지므로 주입구 및 오버플로우의 위치 설정의 오류가 있을 경우 성형수지가 충분히 몰드 내부에 공급되지 못하여 미충진이 발생할 확률이 크다. 이때 기포가 발생하는 원인을 형성기구에 따라 분류하면 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 성형 수지가 충전됨에 따라 몰드내부에 잔존하는 공기가 압축되어 수지의 완전 충진을 방해하는 것과 주입구로부터 거리가 먼 부위가 유동시 마찰손실로 인해 충전되지 않는 경우이다. 첫 번째 원인의 경우 몰드의 성형각도, 공기빼기 구멍의 위치 및 크기 등을 통해 해결하는 것이 일반적이며, 두 번째 원인의 경우에는 주입구 및 오버플로우의 위치 및 크기를 조절하는 방법을 이용한다. 림 성형 몰드의 제작공정상 오버플로우 수를 여러 개로 정하는 것은 무리가 없지만, 게이트수를 복수개로 설정하는 것은 어려우므로 먼저 제품의 크기, 형상에 따라 게이트 위치를 설정한 다음 오버플로우 위치를 선정하는 것이 바람직하다.

림 공정의 기포 발생원인, 위치, 크기 그리고 사출 성형법과의 기포 발생기구 차이를 규명하기 위해 아래와 같은 실험을 실시하였다.

Fig 2와 같이 평판위에 리브(rib)를 일정한 간격으로 설치하고 성형을 실시한 후 위치별, 리브 크기별 기포의 크기를 측정하는 방식을 택하였다. 실험에 사용된 시험편 평판의 길이(a)는 300 mm, 폭(b)은 150 mm이며, 두께는 3 mm이다.

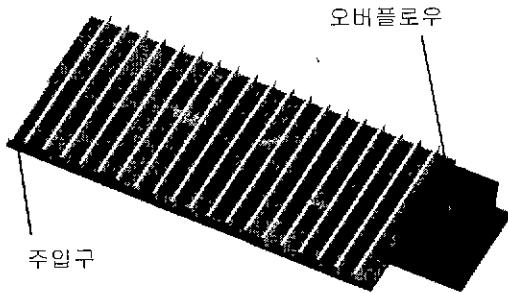


Fig. 2 The geometric feature of the test piece

그리고 리브 사이의 간격은 15 mm이며 두께는 작 1, 2, 3, 4 mm의 4 종류로 하고 높이는 4, 6, 8, 10, 12 mm의 5 종류로 하여 20 개의 시험편을 제작하였으며 실험결과를 성형을 3회 실시한 후의 평균을 기초로 하였다. 그리고 그림 좌측의 돌기 부위는 몰드의 오버플로우로 폭 방향의 중앙에 위치해 있으며 넓이는 70 mm이다. 우측 모서리 부분에 있는 주입구는 폭이 76 mm이며 일상적인 작업조건에 따라 설계한 후 성형을 실시한 것이다. 성형성을 향상시키기 위해 성형공정에서 몰드의 오버

플로우측이 주입구측 보다 100 mm 높도록 경사를 두었다. 주입구 및 오버플로우의 위치 그리고 몰드 경사각은 일반적인 작업공정에 의한 것이며 위치별 기포발생 경향을 정확히 파악하기 위해 공기빼기 구멍은 별도로 설치하지 않았다.

우선 기포가 발생하는 원인을 알아내기 위해 사출 성형 수치상사 모델인 Moldflow를 이용하여 사출성형 후 액체 상태로 용융되어 몰드내로 주입 후 시간이 경과함에 따라 이루어지는 수지의 진행분포를 살펴 보았으며 Fig 3은 그 결과를 보여준다.

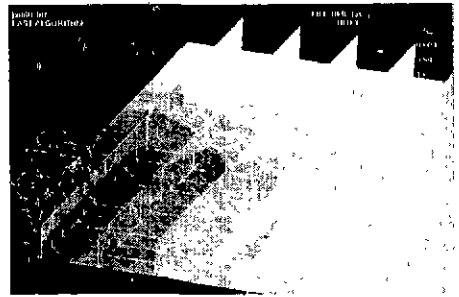


Fig. 3 Material packing profile after injection

수치상사 결과를 보면, 주입구를 지나 수지의 충전이 진행되면서 주입구를 중심으로 거리가 유사한 지점을 통과하는 시간이 거의 유사함을 알 수 있고, 리브 부위에 비해 평판부의 수지 진행 속도가 현저히 빠름을 알 수 있다. 사출 성형에서 사용되는 열가소성 소재는 몰드 내부로 유입되어 급격히 냉각, 고화 되므로 평판부와 리브 사이의 충전 속도 차이는 사출 성형 부품의 기포 발생을 야기하는 원인이 된다. 그러나 림 성형법의 경우에는 성형 소재의 가사시간이 수십 초에서 수분 동안 지속되므로 사출 성형 부품과는 상이한 기포 발생 위치를 가질 것으로 판단된다. 이를 검증하기 위해 기포 발생 위치에 대한 사출성형 해석 결과와 실제 림 성형 부품에서 발생하는 기포 형태를 측정하여 Fig 4. 및 Fig. 5에 나타내었다.

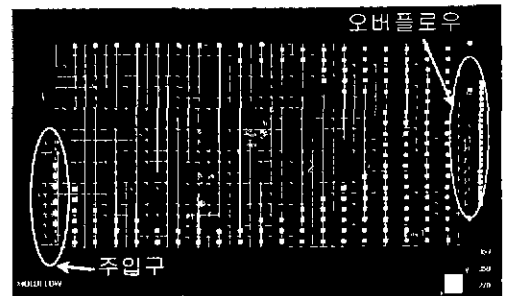


Fig 4 Result of bubble distribution in injection part by computer simulation

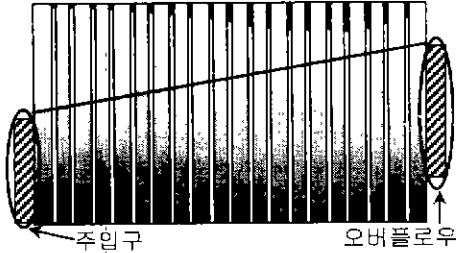


Fig. 5 Experimental result of bubble distribution through RIM process.

사출 성형에 의해 제작된 부품과는 달리 림 성형 부품의 경우 주입구와 오버플로우를 연결한 선 안쪽의 경우에는 기포가 발생하지 않음을 알 수 있는데 이는 리브가 평판부위 보다 늦게 충전 되더라도 수심 초~수분 동안 유지되는 가사시간 전에 지속적으로 성형 소재가 공급 되어 성형 초기 리브 부위에 있는 기포를 제거하기 때문인 것으로 판단된다.

한편 림 성형에 의해 제작된 실제 제품의 경우 보스 및 리브의 형상에 따라 기포발생 화률이 달라지는데 일반적으로는 리브의 높이가 높을수록, 두께가 두꺼울수록 기포가 커지는 경향이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 경향을 확인하기 위해 리브의 두께와 높이가 각각 다른 조건의 시편에 대한 실험을 실시 하였는데, Fig. 6에는 리브의 높이가 8mm로 일정한 경우 두께에 따른 기포발생 경향을 나타내었고 Fig. 7에는 리브 두께가 2mm로 일정할 경우 리브 높이에 따른 기포 크기 변화를 나타낸 것이다. 위의 실험 결과로부터 리브의 두꺼울수록 기포 크기가 작아지는 경향이 있음을 알 수 있으며, 특히 리브 두께가 2mm에서 1mm로 변화하는 구간에서는 기포 크기가 급속하게 증가됨을 알 수 있다. 그리고 리브의 두께를 2mm로 일정하게 했을 때, 리브의 높이가 증가함에 따라 기포의 크기가 커짐을 알 수 있는데 리브 두께감소에 의한 기포의 증가량 보다 높이 증가에 의한 기포 증가량이 현저히 큼을 알 수 있다.

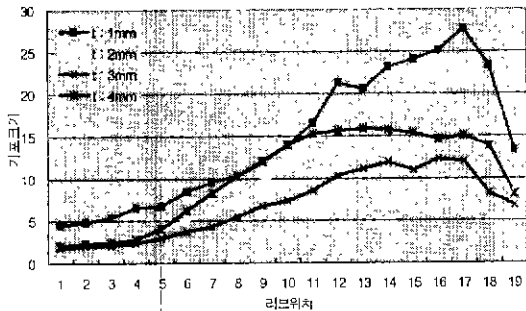


Fig. 6 Change of the bubble size according to the wall thickness

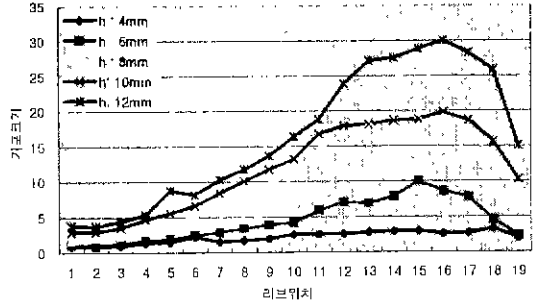


Fig. 7 Change of the bubble size according to the wall height

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 림 공법에서 발생하는 중요한 결함 중 하나인 기포를 방지하기 위한 주입구 설계 방법을 제시하였고 시편 제작 및 성형 해석을 통해 기포의 발생 원인 및 경향에 대해 살펴보았다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 주입구는 수지의 가사 시간 이내에 층류의 형태로 몰드에 유입될 수 있도록 설계해야 하며, 이를 위해 주입구의 높이 및 성형 수지의 유입속도를 조절할 수 있는 주입구 폭을 적절히 설계해야 한다.
 2. 사출성형 부품의 경우에는 부위별 충전 시간 차이에 의해 기포가 발생할 수 있지만, 림 성형품의 경우에는 비교적 긴 가사시간을 갖는 소재를 사용하므로 이러한 원인에 의한 기포 발생은 없고 몰드 구조상 말단부에 있는 위치의 경우에는 기포의 발생을 피할 수 없으므로 이러한 부위에는 공기빼기 구멍과 같은 별도의 장치를 설치하여 기포의 발생을 방지해야 한다.
 3. 림 성형 제품 중에 있는 리브 두께가 얇을수록, 높이가 높을수록 기포의 발생확률이 높으며, 높이에 의한 기포 증가율이 두께 변화에 의한 기포 증가율 보다 높다.
- 향후에는 시간에 따른 점도 변화 모델이 고려된 주입구 설계 방법과 다양한 주입구 및 오버플로우 위치를 가진 시편의 실험을 통한 정확한 기포발생 위치에 측정법의 개발이 요구된다.

참고문헌

1. Philip M. Gerhart "Fundamentals of fluid mechanics", Addison-Wesley Publishing COMPANY, 1985
2. 손병진, 맹주성, 이상환. "유체역학" 최중당, 1992.
3. "MF/WARP 3 I Training Manual" MoldFlow Pty, Ltd. 1994