한국금형공학회지, 제10권 제2호, 2016
J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.10 No.2, 2016 ISSN 2092-9692

# 인몰드 코팅을 위한 2액형 폴리우레탄 공급장치 개발

서봉현[1] · 이호상[†]
한국교통대학교 항공기계설계학과[1,†]

# Development of two-component polyurethane metering system for in-mold coating

Bong-Hyun Seo[1] · Ho-Sang Lee[†]
Dep. of Aeronautical & Mechanical Design Eng., Korea Nat'l Univ. of Transportation[1,†]
(Received May 11, 2016 / Revised May 31, 2016 / Accepted June 03, 2016)

**Abstract:** Injection molded thermoplastic parts may need to be coated to facilitate paint adhesion, or to satisfy other surface property requirements, such as appearance, durability, and weather resistance. In this paper, a two-component polyurethane metering system was developed for the simultaneous injection and surface coating of a plastic substrate. The system was composed of storage tanks, feed pumps, axial piston pumps, mixing head. The tank was designed to be double-jacket structured and fabricated for polyol and isocyanate, respectively. A temperature chamber was used to maintain the material temperature to be 80℃ during flowing from storage tank to mixing head. Inside the chamber, feed pump, low pressure filter, high pressure pump, high pressure filter, pressure sensor, flow meter were installed. A mixing head of L-type was used for homogeneous mixing of polyol and isocyanate. Inside the mixing head, a cartridge heater and a temperature sensor were installed to control the temperature of the materials. The flow rate of axial-piston pump was controlled by using closed-loop feedback control algorithm. The input flow-rates were compared with the measured values. The output error was 6.7% for open-loop control, whereas the error was below 2.2% for closed-loop control. In addition, the pressure generated through mixing-head nozzle increased with increasing flow rate. It was found that the pressure drop between metering pump and mixing-head nozzle was almost 10 bar.

**Key Words:** In-mold coating, Injection molding, Polyurethane, Mixing head, Pump, Closed-loop control

## 1. 서 론

플라스틱 사출성형제품은 고광택, 내스크래치성, 내후성, 기능성 확보 등을 위하여 도장, 도금, 증착 등 다양한 후처리 과정을 거치게 된다. 그러나 기존의 표면처리 방법들은 복잡한 제조공정, 환경 유해물질 배출, 코팅두께의 불균일 등 많은 문제점을 안고 있다. 인몰드 코팅(in-mold coating)은 사출성형공정 중 성형품을 금형으로부터 취출하기 전에 금형 안에서 성형품 표면을 코팅하는 새로운 공법이다. 인몰드 코팅에 사용되는 코팅제는 점도가 매우 낮기 때문에 코팅표면에 미세한 형상을 쉽게 구현할 수 있고 균일한 두께의 코팅 층을 얻을 수 있으며, 사출성형 제품의 대표적인 외관불량인 웰드라인, 싱크마크 등이 코팅 후 은폐되는 장점을 갖고 있다. 또한, 금형 내에서 단일 공정으로 코팅이 이루어지기 때문에 별도의 추가 공정이 필요하지 않고, 기존 공정과 달리 휘발성 유기화합물을 배출하지 않는 장점이 있다. 아울러 코팅제가 모두 도막으로서 제품에 부착되기 때문에 폐기물의 발생도 크게 감소된다[1].

인몰드 코팅 공정은 기재 사출성형과 코팅이 각각 서로 다른 캐비티에서 이루어진다. 기재를 사출성형한 뒤 금형을 개방하고 사출기재를 취출하지 않은 상태에서 캐비티 플레이트를 슬라이딩 방식 혹은 회전 방식을 이용하여 코팅 캐비티로 교체한 뒤 형폐하게 된다. 이어서 금형 하단에 설치된 믹싱

1,† 교신저자 : 한국교통대학교 항공기계설계학과
E-mail: lhs@ut.ac.kr

헤드를 통해 코팅제를 금형 내부로 주입한 후, 코팅제를 경화시키는 공정으로 이루어진다[2].

인몰드 코팅을 위한 소재로서 2 액형 폴리우레탄이 매우 적합하다. 폴리우레탄은 투명도, 고광택, 내스크래치성 등이 매우 우수하고, 대량생산이 가능하다는 큰 장점을 갖고 있기 때문이다. 이로 인하여 폴리우레탄은 자동차, 가전, 디스플레이 등에서 사용되는 다양한 종류의 플라스틱 내 · 외장 부품의 표면을 코팅하는데 많이 사용된다. 폴리우레탄은 폴리올(polyol)을 주성분으로 하는 주제와 이소시아네이트(isocyanate)를 주성분으로 하는 경화제로 구성되며, 화학적인 반응에 의하여 고체 상태로 경화된다. 하드코팅용 폴리우레탄은 온도가 낮을 경우 점도가 매우 높기 때문에 주제와 경화제의 혼합이 거의 이뤄지지 않으며, 유동성이 낮아 금형 안으로 토출되지 않는다. 따라서 원료의 온도를 약 80℃로 균일하게 유지시켜 점도를 크게 낮춘 상태에서 주제와 경화제를 혼합하고 토출하는 것이 매우 중요하다[3].

2액형 폴리우레탄을 사용하여 인몰드 코팅을 구현하기 위하여 고압방식의 공급장치가 필요하다. 고압방식은 미터링 펌프(metering pump)를 사용하여 저장탱크에 있는 주제와 경화제를 각각 믹싱헤드(mixing head) 까지 이송한 후, 믹싱헤드(mixing head) 내부의 좁은 챔버(chamber) 안에서 주제와 경화제가 각각의 노즐을 통해 서로 고압으로 충돌하면서 혼합이 이루어지고, 이때 형성된 180 bar 정도의 높은 압력에 의하여 혼합된 원료를 밀폐된 금형 안으로 토출하는 방식이다.

기존의 국내에서 생산되는 고압방식의 폴리우레탄 주입장치는 토출량이 15g/s 이상으로 인몰드 코팅에 필요한 초소용량 주입장치는 개발되어 있지 않으며, 원료온도를 80℃까지 균일하게 유지하는 것이 불가능하다. 또한 기존에는 주입 공정조건 제어를 위하여 PLC 시퀀스 제어방식을 사용하고 있기 때문에, 원료의 온도 및 압력 변화에 따라 토출 유량의 편차가 심하게 발생하고, 재현성이 낮은 문제가 있다.

자동차, 모바일, 전자 부품 제조공정에서 클리어 표면코팅을 하거나, 기밀성, 진동 저항력 등을 확보할 목적으로 폴리우레탄을 적용하기 위해서는 5g/s 정도의 초소용량 토출이 가능한 고압 주입장치가 필수적이며, 매우 정밀한 토출량 제어가 가능하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 원료 히팅 및 온도제어를 위한 저장탱크, 초소용량 미터링 펌프, 카트리지 히터가 설치된 믹싱헤드, 정밀 토출을 위한 폐회로 피드백 제어(closed-loop feedback control) 시스템 등을 구축하고, 실험을 통해 토출 정밀도를 평가하고, 펌프와 노즐에서 발생하는 압력에 관하여 고찰하였다.

## 2. 공급장치

### 2.1 시스템 구성

인몰드 코팅을 위하여 2액형 폴리우레탄 공급장치를 설계/제작하였으며, 구성은 크게 주제 및 경화제의 저장탱크, 저압 피드펌프, 고압 축류 피스톤 펌프, 믹싱헤드로 구분된다.

탱크로부터 유입된 원료가 믹싱챔버까지 공급되면서 열전달에 의하여 원료의 온도가 떨어지지 않도록 하기 위하여 히팅챔버를 사용하였으며, 피드펌프, 저압필터, 고압펌프, 고압필터, 압력센서, 유량계 등을 히팅챔버 내부에 설치하였다.

Fig. 1은 공급장치의 구성도로서 주제의 공급장치만을 도시한 것이다. 저장탱크 안에서 80℃의 온도를 유지하고 있는 원료는 기어 방식의 저압 피드펌프에 의하여 고압 펌프로 공급된다. 고압펌프는 축류 피스톤 펌프로서 설정된 토출유량에 맞도록 사판 각도와 모터의 회전속도 제어에 의하여 원료를 이송하며, 고압필터, 압력센서, 그리고 유량계를 거쳐 히팅호스를 따라 믹싱헤드까지 공급된다. 또한 코팅제를 토출하지 않을 경우에는 믹싱헤드를 통과한 원료가 리턴라인을 통해 저장탱크로 순환되도록 구성하였다.

### 2.2 저장탱크

원료의 온도를 균일하게 유지하기 위하여 이중벽 구조의 저장탱크를 개발하였다. 주제와 경화제 탱크의 용량을 각각 30리터로 설계하였으며, 온수를 이용한 가열을 통해 원료의 온도가 일정하게 유지되도록 하고, 온수의 입구와 출구는 탱크 하단부에 설치하였다. 또한 탱크 내부의 원료를 서서히 교반하여 온도를 고르게 전달하고 화학적 성분의 분리를 방지하며, 탈포를 용이하게 할 수 있도록 감속기 모터와 임펠러로 구성된 교반기를 설치하였다. 그리고 탱크 안에서 원료에 포함된 기포를 제거하기 위하여 진공펌프를 설치하였다. Fig. 2는 원료의 내압에 의한 변형이 없도록 원통형상으로 제작된 이중벽 구조의 저장탱크를 나타낸다.

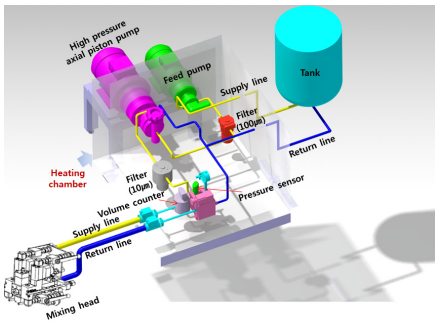


Fig. 1 Layout of metering system

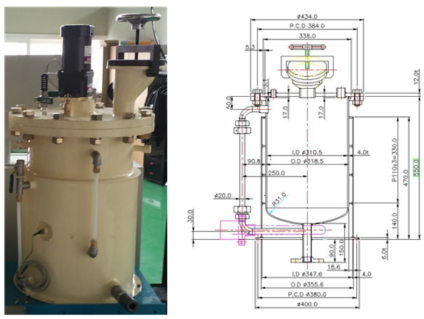

Fig. 2 Storage tank with cylindrical shape

### 2.3 고압펌프

피드펌프와 저압필터를 거쳐 공급된 원료를 믹싱헤드까지 공급하기 위한 고압펌프로서 축류 피스톤 펌프(axial piston pump)를 사용하였다. 구동축을 회전시키기 위하여 2.2 kw 3상 모터를 사용하였으며, 모터의 회전수를 제어하기 위해 인버터를 사용하였다. 이때 모터의 회전속도는 식 (1)과 같다.

$$v = \frac{120 \times f}{p}[rpm] \qquad (1)$$

여기서 사용된 모터의 극수(p)는 6이며, 인버터의 주파수($f$)를 변화시키면서 모터의 회전속도를 제어하여, 궁극적으로 모터에서 원료의 토출량을 제어할 수 있도록 하였다. 또한 설정된 토출량이 모터의 회전속도 제어 범위를 벗어날 경우에는 다이얼 인디케이터를 사용하여 사판 각도를 변경할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 사용된 축류 피스톤 펌프는 토출량 최대 2 cc/rev, 회전속도 200~1,800rpm, 최대 토출압력 250 bar, 최대 입구압력 20 bar, 최대온도 80℃에서 사용할 수 있도록 하였다. 펌프의 토출유량($\dot{q}$)을 만족시키기 위하여 설정하는 주파수(f)는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$f = \dot{q}\frac{p}{120}\,60\,\frac{\theta_{total}}{\theta}\frac{1}{\dot{q}_{\max}}[Hz] \qquad (2)$$

여기서 $f$는 주파수, $\dot{q}$는 펌프의 토출유량, $p$는 모터의 극수, $\theta_{total}$은 사판의 최대 각도, $\theta$는 설정된 사판의 각도, 그리고 $\dot{q}_{\max}$는 펌프의 최대 토출유량을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 사판의 최대 각도는 24°이다.

지나치게 높은 원료 압력으로부터 펌프를 보호하기 위하여 기계적인 압력 릴리프 밸브를 펌프의 입력 포트와 출구 플랜지 사이에 직접 설치하고, 압력 릴리프 밸브가 개방될 때 원료가 바이패스 라인을 통해 흡입 플랜지로 리턴되도록 하였다. 유량계를 보호하고, 고압라인의 막힘이 발생하지 않도록 축류 피스톤 펌프와 유량계 사이에 고압필터를 설치하였다. 특히, 경화제(isocyanate)는 약간의 습기에도 침전물이 생성되므로 이를 걸러내기 위하여 10μm크기의 메쉬(mesh)를 갖고 있으며, 100도까지 견딜 수 있는 고압필터를 사용하였다. 또한 회전 시 원료의 누설을 방지하기 위하여 마그네틱 커플링을 사용하였으며, 고압펌프로부터의 토출유량과 발생압력을 실시간으로 측정할 수 있도록 유량계와 압력센서 및 압력게이지를 설치하였다.

펌프로부터 토출된 원료는 히팅 호스를 따라 믹싱헤드까지 공급되도록 하였다. 이 때, 폐회로 제어를 통해 토출유량의 설정 값과 유량계를 통한 측정값을 비교하여 오차를 계산하고, 유량조정 신호에 따라 주파수 변환기를 통해 펌프의 속도를 자동으로 제어하도록 하였다. Fig. 3은 고압 미터링펌프의 구성을 나타낸다.

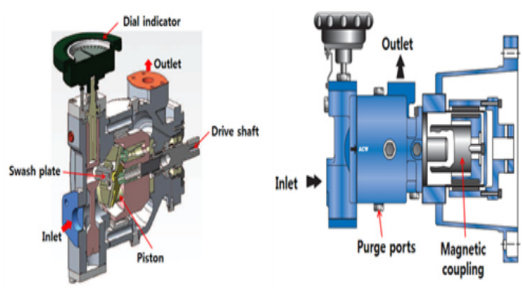


Fig. 3 Axial piston pump and magnetic coupling

### 2.4 믹싱헤드

Fig. 4(a)는 클리닝 피스톤과 믹싱챔버 피스톤이 전진 위치에 있으며, 주제와 경화제가 서로 만나지 않고 탱크까지 재순환하는 상태를 나타낸다.

토출 신호를 받으면 Fig. 4(b)와 같이 클리닝 피스톤과 믹싱챔버 피스톤이 후진하며, 노즐을 통해 분사된 주제와 경화제가 서로 충돌하면서 균일한 혼합이 이뤄지고, 출구(Outlet)을 통해 금형 안으로 주입된다. 이후 믹싱챔버 피스톤이 다시 전진하게 되고, 마지막으로 클리닝 피스톤이 전진하면서 관내에 남아있는 원료를 금형 안으로 밀어내게 된다. 원료 온도조절을 위하여 카트리지 히터와 온도센서, 그리고 노즐압력 모니터링을 위한 압력센서를 설치하였다. Fig. 5는 믹싱헤드의 내부 구조를 나타낸다. Polyol 측에 0.12 mm, Isocyanate 측에 0.13 mm 직경을 갖는 노즐을 적용하여 토출실험을 수행하였으며, 이때 180 bar 수준의 압력을 발생시킬 수 있었다[4].

### 2.5 폐회로 제어

유량계를 사용하여 토출량을 실시간으로 측정하고, 모터의 속도를 제어하여 온도 및 점도의 변동에 관계없이 항상 일정한 유량을 토출할 수 있도록 피드백 폐회로 제어(closed-loop control) 시스템을 구축하였다. Fig. 6은 PID 제어 블록선도를 나타내며, 이때 사용된 식은 (3)과 같다.

$$P = K_c \cdot \epsilon + \frac{K_c}{T_i}\int \epsilon\, dt + K_c \cdot T_d \cdot \frac{d\epsilon}{dt} + P_0 \qquad (3)$$

여기서 $K_c$는 Gain, $\epsilon$은 오차, $T_i$는 적분 시간상수, $T_d$는 미분 시간상수, 그리고 $P_0$는 초기 값을 나타낸다.

최적의 제어 조건을 찾기 위하여 Gain 과 Reset 값을 조정하여 펌프 동작 이후 안정된 압력 도달시간을 측정하였다. Fig. 7은 Reset 값을 10으로 고정시킨 상태에서 P(gain) 값의 변화에 따른 압력변화를 나타낸 것이다. P(gain) 값이 0.2일 때에는 적정 압력인 170 bar를 만족하지 못한 채 상승시간이 상당히 길고, Gain 값이 점차 증가함에 따라서 적정 압력에 도달하는 시간이 더욱 빨라짐을 알 수 있다. 본 연구에서는 P(gain)값을 1로 설정하여 상승시간을 줄이고 정상상태 오차가 발생하지 않도록 하였다. 또한 P(gain) 값을 1로 고정시킨 상태에서 I(reset) 값을 10~50 구간에서 변화시키며 압력추이를 고찰하였다. 그 결과 I(reset) 값이 10일 때 정상상태 오차가 가장 작게 발생함을 확인하였다.

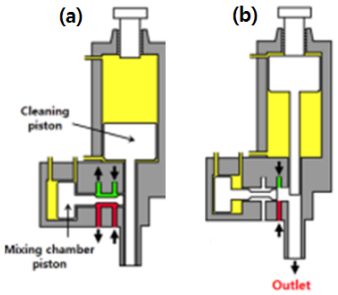


Fig. 4 Mixing head: (a) circulation position (b) shot position

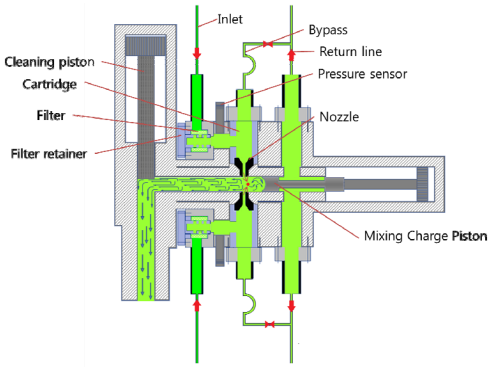


Fig. 5 Inner structure of mixing head

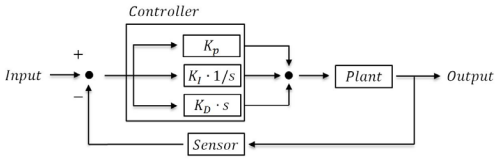


Fig. 6 Block diagram of PID controller

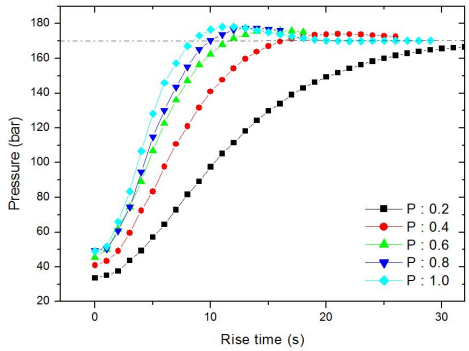


Fig. 7 Pressure trace under various P(gain) value

## 3. 성능시험 결과 및 분석

인몰드 코팅 실험을 위하여 구축된 장치는 Fig. 8과 같으며, 실험에 사용된 코팅제는 독일의 Votteler 사에서 제조한 2액형 폴리우레탄(polyol : PU993, isocyanate : PU955)이다. 코팅제 공급장치의 토출 정밀도를 확인하기 위하여 개방루프제어(open-loop contrl)와 폐회로제어를 적용한 경우에 대하여 각각 고찰하였다.

Fig. 8 Two-component polyurethane metering system

개방루프제어 조건에서 코팅제 반복 토출 정밀도를 측정하기 위해 사판각도를 1º, 토출 유량을 3.75 g/s (Polyol : 1.75 g/s, Isocyanate : 2.0 g/s) 로 고정시키고, 토출시간을 각각 2초, 3초, 4초 동안 5회씩 토출하여 설정된 값과 실제 토출량을 비교하여 오차를 측정하였다.

Table 1은 토출중량 측정결과를 나타내며, 식 (4)를 사용하여 설정한 중량($w_q$)에 대한 실제 토출중량($w$)을 비교하여 최대오차($\epsilon_{max}$)를 계산하였다. Fig. 9는 주입시간에 따른 최대오차를 나타낸 것이며, 2초에서 6.71%, 3초에서 6.03%, 4초에서 4.44%의 오차가 발생하였다.

$$\epsilon_{max} = \left| \frac{w - w_q}{w_q} \right| \times 100 \qquad (4)$$

한편 유량센서 신호를 바탕으로 폐회로 피드백 제어를 적용하여 주제와 경화제의 토출유량을 각각 0.4~1.6 g/s 범위에서 0.2 g/s씩 증가시키며 실험을 수행하였다. Fig. 10은 토출유량 변화에 따른 설정 유량대비 측정유량의 오차비를 나타낸다. 유량이 0.4 g/s 에서 오차가 가장 크게 발생하고, 0.6 g/s이상에서는 2.2% 이내로 오차가 크게 감소하고 있음을 알 수 있다.

결국 폐회로제어를 적용했을 경우 주제와 경화제 모두 0.6 g/s 이상에서 개방루프제어에 비해 약 2~3배가량 정밀한 제어가 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 유량이 0.4 g/s 이하로 매우 적은 경우에는 공급장치의 제어 정밀도가 떨어지고, 신뢰성을 보장할 수 없을 것으로 판단된다.

Table 1 Weight measured under various shot time

| Shot time(sec) | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Weight(g) | 7.953 | 11.927 | 15.638 |
| | 7.967 | 11.928 | 15.642 |
| | 7.987 | 11.898 | 15.666 |
| | 8.003 | 11.847 | 15.633 |
| | 7.967 | 11.908 | 15.648 |

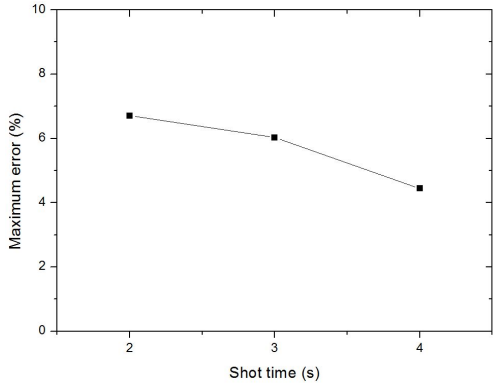


Fig. 9 Maximum error vs. shot time for open-loop control

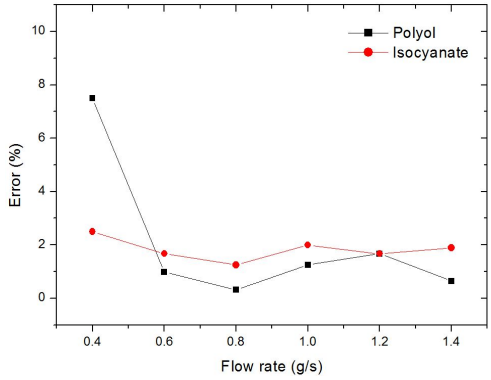


Fig. 10 Output error vs. flow rate for closed-loop control

탱크로부터 공급된 원료가 고압펌프를 통해 믹싱헤드 내부 노즐까지 도달하게 되며, 이때 발생하는

노즐 압력을 측정하였다. Fig. 11은 토출유량을 변화시키면서 주제와 경화제의 펌프 및 노즐 압력을 측정한 결과를 나타낸다. 펌프 및 노즐압력은 유량이

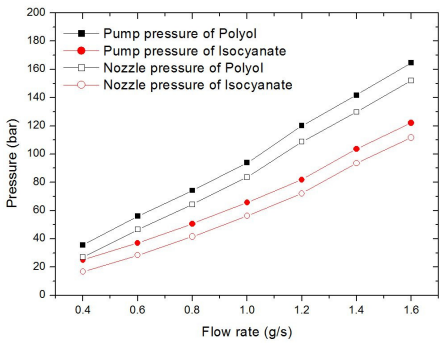


**Fig. 11** Pump and nozzle pressures along the flow rate

증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 펌프압력과 노즐압력의 차이는 약 10bar 정도로 토출유량에 관계없이 거의 일정하게 발생하고 있음을 알 수 있다. 동일한 유량에서 Polyol의 압력이 Isocyanate의 압력에 비해 높은 것은 Polyol 쪽의 노즐직경은 0.12mm로서 Isocyanate 쪽의 노즐직경 0.13mm보다 작기 때문이다.

## 4. 결론

사출성형과 표면코팅을 금형 안에서 동시에 구현하는 인몰드 코팅을 위하여 2액형 폴리우레탄 정량공급 장치를 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이중벽 구조의 저장탱크를 적용하여 원료온도 80℃를 유지할 수 있었으며, 고압 축류 피스톤 펌프를 적용하여 인몰드 코팅 공정에 적용 가능한 수준의 높은 압력을 발생시킬 수 있었다.

2) L자형 구조의 믹싱헤드를 적용하여 주제와 경화제의 균일한 혼합이 가능하도록 하였으며, Polyol 측에 0.12 mm, Isocyanate 측에 0.13 mm 직경을 갖는 노즐을 사용하여 180 bar 수준의 압력을 확보할 수 있었다.

3) 폐회로 피드백제어를 적용했을 경우 주제와 경화제 모두 0.6 g/s 이상일 때 토출 정밀도 오차는 2.2% 이하로 나나났으며, 개방루프제어에 비해 약 2~3배가량 정밀한 제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

4) 유량이 0.4 g/s 이하로 매우 적은 경우에는 공급장치의 제어 정밀도가 떨어지고, 신뢰성을 보장할 수 없는 것으로 나타났다.

5) 펌프압력과 노즐압력은 토출유량이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며, 펌프압력과 노즐압력의 차이는 약 10 bar 정도로 나타났다.

## 후기

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 10063340).

## 참고문헌

1) Gite, V. V, Rajput, S. D. and Yemul, O. S, “Advances in polyurethane coating technologies”, Chemical Weekly, Vol. 58, No. 2, pp. 201-208, 2012.
2) Gruber, M., “Integrated system for producing composites”, KraussMaffei Technologies, US Patent, No. 0317893, 2008.
3) Lee, H.S. and Kim, D.M., “A study on the cavity pressure and mixing characteristics in in-mold coating processes”, Proc. KSMTE Conf., p. 152, 2014.
4) Kim, D.M. and Lee, H.S, “Experimental study on the processing conditions of in-mold coating for injection-molded plates”, Int. J. Prec. Eng. Manuf., Vol. 17, No.10, pp. 1333-1339, 2016.