

인몰드 코팅을 위한 이액형 폴리우레탄의 혼합특성에 관한 해석적 연구

A Study on Mixing Characteristics of Two-component Polyurethane for In-mold Coating

이호상^{1,✉}, 김동미¹
Ho Sang Lee^{1,✉} and Dong Mi Kim¹

¹ 한국교통대학교 항공기계설계학과 (Department of Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National Univ. of Transportation)
✉ Corresponding author: lhs@ut.ac.kr, Tel: +82-43-841-5375

Manuscript received: 2012.11.8 / Accepted: 2012.12.4

In-mold coating is a reactive fluid designed to improve the surface quality of injection molded thermoplastic substrate in functional and cosmetic properties. In this study, a mixing head for in-mold coating was designed, and mixing characteristics of two-component polyurethane flowing through runner were investigated based on flow simulations. In order to achieve uniform mixing of two components injected through straight mixing head, an impingement aftermixer was used in runner design. Semi-circular cross-section was better than circular one for runners for uniform mixing. With increasing runner length and flow rate, mixing became more uniform. In addition, the degree of mixing was more improved with decreasing viscosity of isocyanate.

Key Words: In-Mold Coating (인몰드 코팅), Mixing Head (믹싱헤드), Polyurethane (폴리우레탄), Aftermixer (애프터믹서), Runner (러너), Two-Component (이액형), Volume Fraction (혼합비)

1. 서론

열가소성 수지의 사출성형품은 자동차, 가전, 디스플레이 등 매우 다양한 분야에 사용되고 있다. 그러나 많은 성형품에서 내구성, 내후성 등을 높이거나 도료 접착성을 향상시키기 위하여 별도의 코팅 공정이 요구된다. 이 과정에서 휘발성 용제 사용에 의한 환경오염, 코팅 두께의 불균일, 후공정에 의한 제조비용 상승 등 다양한 문제가 발생한다.

인몰드 코팅은 열가소성 수지를 사출성형한 후 액체 상태의 경화형 코팅재를 금형 안에 주입하고 수 MPa의 압력을 유지하여 금형에 압착한 상태로 경화시키는 새로운 코팅 방법이다.¹⁻³ 인몰드 코팅에서 사용되는 소재는 휘발성 유기용제를 포함하지 않으며, 공정 중 어떠한 유기화합물을 배출하

지 않기 때문에 친환경적이며, 주입된 코팅재가 모두 성형품 표면에 부착되기 때문에 두꺼운 코팅에 유리하고, 균일한 두께를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있다. 금형 표면의 전사성이 우수하여 미세한 형상을 재현할 수 있으며, 유리섬유 강화 수지를 적용할 경우 섬유가 없는 수지 성형품과 유사한 표면 상태를 구현할 수 있다. 뿐만 아니라 웰드라인, 싱크마크 등과 같은 성형 불량에 코팅 표면에 나타나지 않도록 할 수 있다.

최근 열가소성 기재 표면에 고풍택, 내스크래치성 등을 구현하기 위하여 폴리우레탄을 적용한 인몰드 코팅 기술이 유럽의 선진 자동차 분야에서 적용되고 있는 상황이다. 폴리우레탄은 투명도, 광택도, 내구성, 복원력 등이 매우 우수하고, 대량생산이 가능하다는 큰 장점을 갖고 있다.⁴

폴리우레탄은 온도가 낮은 경우 점도가 매우 높기 때문에 유동성이 좋지 않고 혼합이 제대로 이루어지지 않으며, 반대로 온도가 너무 높을 경우에는 경화로 인해 성형이 힘들어진다. 따라서 주제와 경화제의 혼합, 그리고 혼합된 원료의 토출이 용이하도록 하기 위해서는 각각의 탱크와 이동 파이프라인의 온도를 일정하게 유지하는 것이 필요하다. 그리고 금형 안으로 토출이 종료된 후 믹싱헤드에 잔류하는 혼합된 원료를 완전히 제거하여야 한다.

이액형 폴리우레탄 주입장치는 Fig. 1 에서 보여진 바와 같이 주제 및 경화제를 각각 점도가 낮은 액상으로 유지하기 위한 저장탱크와 온도 조절부, 탱크로부터 혼합 토출부로 원료를 공급하기 위한 펌프 및 모터, 각각의 원료가 이동할 수 있는 파이프라인, 두 원료가 충돌하면서 혼합되는 믹싱헤드, 제어부 등으로 구성되어 있다.^{5,6} 이때 주제 원료로 폴리올(polyol), 경화제로 이소시아네이트(isocyanate)를 사용한다.

폴리우레탄을 적용한 인몰드 코팅에서 중요한 것은 폴리우레탄 주제와 경화제를 일정 비율로 균일하게 혼합하는 것이다. 왜냐하면 혼합 정도에 따라 화학적 반응, 기계적인 물성 등이 크게 달라지기 때문이다. 혼합에 사용되는 가장 일반적인 방법은 2 성분이 작은 챔버 안에서 고속으로 만나도록 하는 충돌형 믹서를 사용하는 것이다. 충돌하는 젯트가 난류유동을 유발하고 서로 혼합된 상태에서 금형 캐비티로 흘러 들어가도록 한다.

Tucker 와 Suh⁷ 는 이액형 충돌형 믹싱 실험 장치를 제작하고 유동가시화 실험을 통하여 다양한 레이놀즈(Reynolds) 수와 노즐 크기에 따른 난류 유동 패턴을 관찰하고, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 혼합특성이 향상되고 있음을 설명하였다. 또한 그들은 섬유 현탁액에 대한 혼합실험을 통해 충돌형 애프터믹서(aftermixer)사용이 믹싱에 효과적인 방법임을 나타냈다.⁸

본 연구에서는 인몰드 코팅에 적용하기 위하여 이액형 폴리우레탄을 금형에 주입할 수 있는 믹싱헤드를 설계하였으며, 직선형 믹싱헤드에서 레이놀즈수가 작을 경우 균일한 혼합을 구현할 수 없는 문제를 보완하기 위하여 애프터믹서를 사용한 금형 러너를 설계하였다. 그리고 유동해석을 적용하여 러너 형상, 유량, 점도 등이 이액형 폴리우레탄의 혼합 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

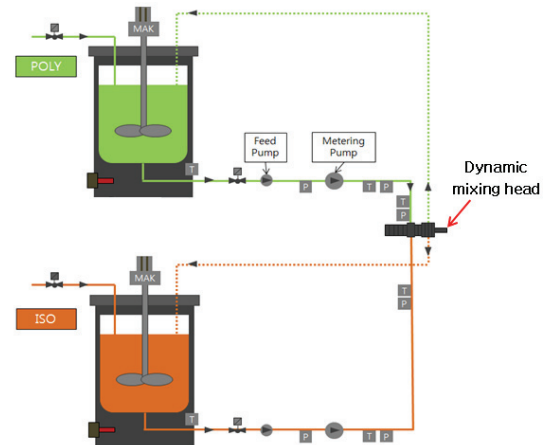


Fig. 1 Schematics of two-component PUR feeding system

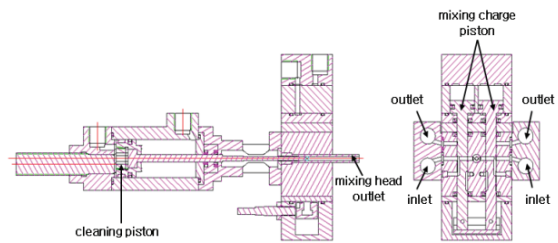


Fig. 2 Pouring stage in mixing head

2. 믹싱헤드에서의 혼합특성

2.1 믹싱헤드 설계

Fig. 2 는 직선형 믹싱헤드에 대한 설계도를 나타낸다. 폴리올 및 이소시아네이트 라인을 연결한 상태에서 유압탱크의 펌프를 작동하면 Fig. 2 와 같이 유압 작동유에 의해 크리닝 피스톤이 후진하고, 믹싱챔버 피스톤이 전진하면서 각각의 분사노즐이 개방되어 폴리올과 이소시아네이트가 고압으로 분사된다. 폴리올과 이소시아네이트는 믹싱헤드 안에서 서로 충돌하면서 난류에너지를 발생시키고, 와류가 형성된다. 혼합된 난류 유동은 토출관을 통과하면서 층류 유동이 되어 금형에 주입된다.

2.2 혼합특성 해석

Fig. 3 에서 보여진 믹싱헤드의 기초적인 설계안에 대하여 폴리올과 이소시아네이트의 충돌에 따른 혼합특성을 해석하였다. 이때 난류 유동을 지배적인 형태로 가정하였으며, 또한 유동시간이 1 초 이하로 매우 짧기 때문에 경화는 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

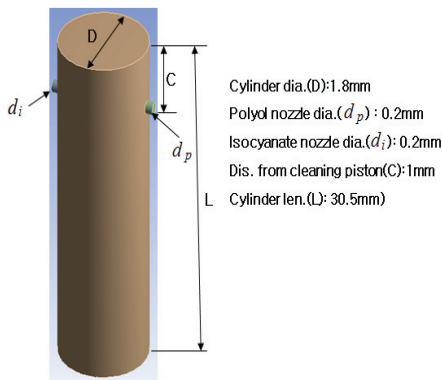


Fig. 3 Mixing head design parameters

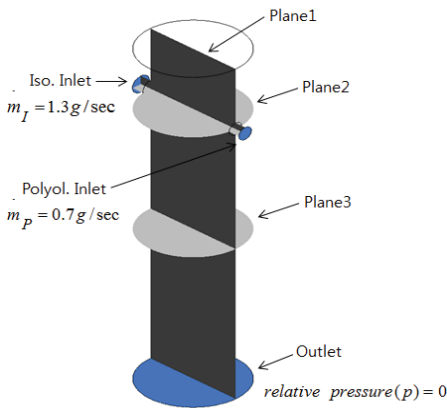


Fig. 4 Boundary conditions

독일의 Votteler 사에서 제조한 소재인 Puriflow (polyol: 33900-1-0820, isocyanate: 38900-0-0820)를 사용하였으며, 폴리올과 이소시아네이트의 점도는 80°C 사용조건에서 각각 176 cps, 320 cps 이고, 밀도는 각각 1.12 g/ml, 1.15 g/ml 이며, 폴리올과 이소시아네이트의 혼합비는 100:180 을 적용하였다. 유동해석을 위하여 ANSYS-CFX⁹ 를 사용하였으며, k-ε 난류모델을 적용하였다. 해석을 위한 경계조건은 Fig. 4 와 같이 유량, 압력, 혼합비 분포 등이 적용되었다.

Fig. 5 는 폴리올 유량 0.7 g/sec, 이소시아네이트 유량 1.3 g/sec 인 경우에 대하여 해석한 결과이며, Fig. 4 에서 정의된 평면 2 와 토출부 단면에서의 폴리올 난류운동 에너지 분포를 나타낸 것이다. 여기서 색깔은 난류에너지 분포를 나타내며 벡터의 크기와 방향은 속도의 크기와 방향을 나타낸다. 폴리올과 이소시아네이트의 정면 충돌이 일어나는 단면에서는 큰 난류에너지가 발생하지만, 토출부에서는 소멸되고 있음을 알 수 있다.

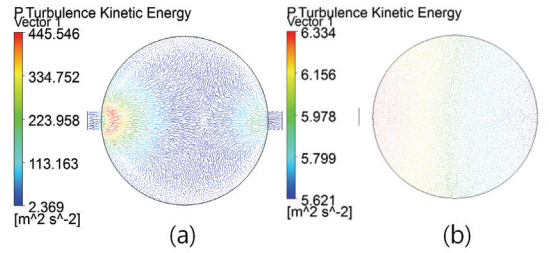


Fig. 5 Turbulence kinetic energy of polyol at (a) plane 2, (b) outlet

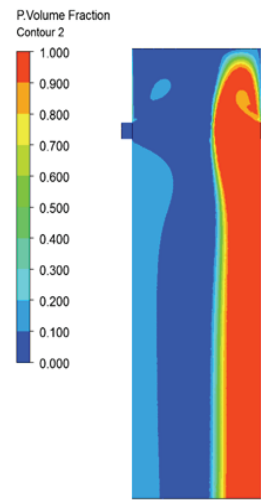


Fig. 6 Volume fraction of polyol

Fig. 6 은 길이방향 단면에서 폴리올의 체적비를 나타낸 것으로 2 개의 성분이 거의 섞이지 않은 상태에서 믹싱헤드로부터 토출되고 있음을 알 수 있다. 위에서 기술된 해석조건에서 폴리올과 이소시아네이트의 레이놀즈수는 각각 25.9, 25.3 이며, 이는 Tucker 와 Suh⁷ 의 실험에서 150 이하의 레이놀즈 수에서는 거의 혼합이 이루어지지 않은 결과와 일치한다.

3. 러너에서의 혼합특성 해석

폴리올과 이소시아네이트를 균일하게 혼합시키기 위한 믹싱헤드의 형상은 난류 유동을 활발하게 발생시킬 수 있도록 직선형보다 더욱 복잡한 형상이 필요하다. 그러나 믹싱헤드의 형상이 복잡할 경우 믹싱헤드 내부에서 형성되는 단단한 경화층을 클리닝하는 것이 매우 어려워지고, 내구성이 떨어지는 문제가 있다. 본 논문에서는 직선형 믹

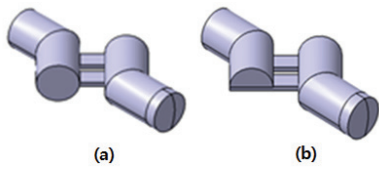


Fig. 7 Cross-section shape of runner: (a) circular, (b) semi-circular

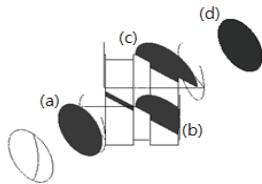


Fig. 8 Cross-sections for plotting turbulence kinetic energy distribution

상헤드를 적용하고, 대신에 폴리올과 이소시아네이트를 금형 안에서 균일하게 혼합시킬 수 있도록 애프터믹서¹⁰ 역할을 할 수 있는 러너형상 설계에 대하여 고찰하였다. 금형 러너를 통과하는 과정에서 폴리올과 이소시아네이트의 혼합특성을 해석하기 위하여 믹싱헤드와 조립되는 러너 입구에서 두 성분이 서로 혼합되지 않은 상태로 주입되는 것으로 가정하였다.

3.1 러너의 단면형상

Fig. 7 과 같이 러너의 단면형상이 원형과 반원형인 경우에 대하여 각각 유동해석을 수행하였다. 이때 폴리올 및 이소시아네이트의 유량을 각각 7 g/sec, 13 g/sec 으로 설정하였다.

Fig. 8 은 위치별 난류 운동에너지를 비교하기 위한 단면을 나타낸다. Fig. 9 와 Fig. 10 은 각각 원형 단면 및 반원형 단면의 러너에 대하여 Fig. 8 에서 표시된 단면에서의 난류 운동 에너지를 나타낸다. Fig. 10 에서 나타난 반원형 단면 형상의 경우 입구부의 원형에서 중간부의 반원형으로 단면이 변하기 때문에 Fig. 9 에서 보여진 원형 단면인 경우에 비해 유동에 의하여 발생하는 난류에너지가 더욱 큼을 알 수 있다. 특히, 얇은 판으로 유동이 진행 될 때 반원형 단면인 경우의 난류 에너지가 더욱 큼을 알 수 있다. 반면에 러너 출구에 가까워질수록 난류 유동이 층류 유동으로 변하기 때문에 난류에너지 값이 크게 줄어들고 있으며, 러너단면 형상에 상관없이 매우 작은 난류에너지 값을 가지고 있음을 볼 수 있다.

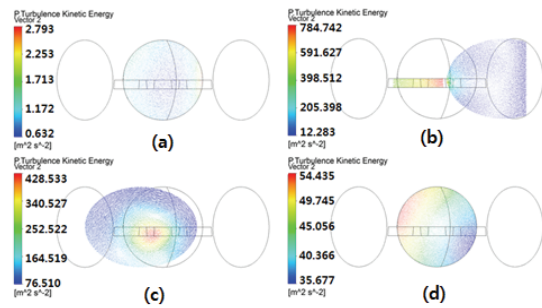


Fig. 9 Turbulence kinetic energy of polyol at cross-sections indicated in Fig. 8 for the case of circular runner

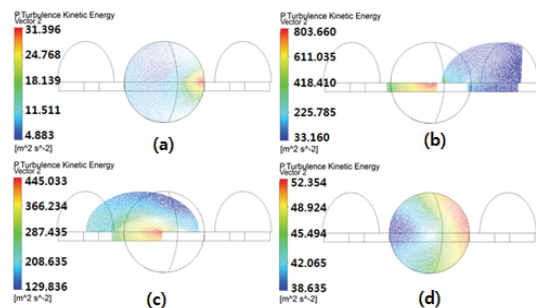


Fig. 10 Turbulence kinetic energy of polyol at cross-sections indicated in Fig. 8 for the case of semi-circular runner

Fig. 11 과 Fig. 12 는 각각 원형 단면 및 반원형 단면을 갖는 러너를 통과하면서 나타나는 폴리올의 혼합비를 나타낸다. 각 그림에서 왼쪽 결과는 러너길이에 따른 혼합비 분포이며, 오른쪽 결과는 러너 출구면에서의 혼합비 분포를 나타낸다. 원형 러너의 경우 단면의 오른쪽 부분에는 이소시아네이트만 존재하며, 왼쪽 부분에는 폴리올만 존재하면서 혼합이 거의 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. 반면에 반원형 러너를 적용할 경우에는 단면 중심부에 이소시아네이트가 적지 않게 존재하지만, 원형 단면에 비하여 폴리올과의 혼합이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

3.2 러너 길이

폴리올과 이소시아네이트의 혼합에 유리한 것으로 판단되는 반원형 단면의 러너를 사용하고, 폴리올 및 이소시아네이트의 유량을 각각 7 g/sec, 13 g/sec 로 설정하였다. 러너길이의 변화에 따른 혼합특성을 파악하기 위하여 Fig. 13 과 같이 길이

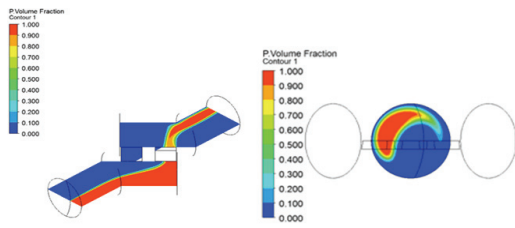


Fig. 11 Volume fraction of polyol through circular runner

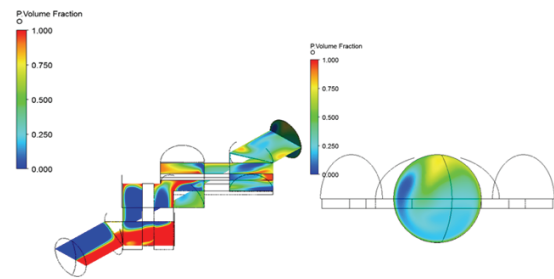


Fig. 14 Volume fraction of polyol through runner length of 12.5 mm

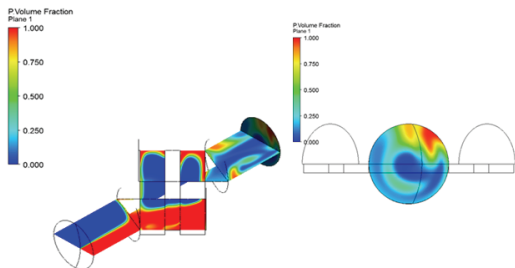


Fig. 12 Volume fraction of polyol through semi-circular runner

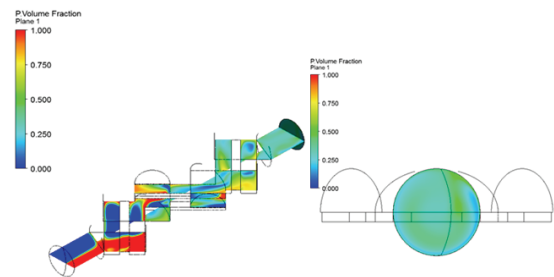


Fig. 15 Volume fraction of polyol through runner length of 16.5 mm

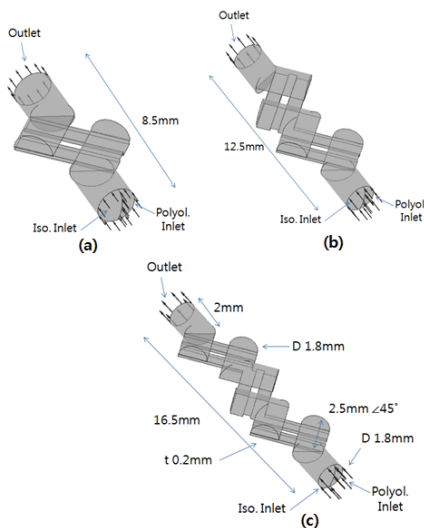


Fig. 13 Types of runner design with various lengths: (a) 8.5 mm, (b) 12.5 mm, and (c) 16.5 mm

가 8.5 mm, 12.5 mm, 16.5 mm 인 경우에 대하여 각각 러너 형상을 설계하였으며, 유동해석을 수행하였다.

Fig. 14 와 Fig. 15 는 각각 러너 길이가 12.5 mm, 16.5 mm 인 경우에 대하여 러너를 통과하면서 나타나는 폴리올의 혼합비를 나타낸다. Fig. 12 에서 살펴 본 러너 길이 8.5 mm 의 경우에 비해

러너 길이가 12.5 mm, 16.5 mm 로 증가할수록 난류유동이 활발해지는 구간이 많기 때문에 폴리올과 이소시아네이트의 혼합이 매우 균일하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 특히, 폴리올과 이소시아네이트의 균일한 혼합을 만족시키기 위한 러너 길이는 16.5 mm 가 적정함을 알 수 있다. 그러나 러너 길이가 12.5 mm, 16.5 mm 인 경우 요구되는 주입구 압력은 각각 109 bar, 164 bar 로 매우 높게 나타났으며, 이 압력은 본 연구에서 개발하고 있는 이액형 폴리우레탄 주입장치의 최대압력 100 bar 를 초과하기 때문에 적용할 수 없는 조건으로 판단하였다.

3.3 유량

폴리올과 이소시아네이트의 균일한 혼합을 만족시키도록 러너 길이를 16.5 mm 로 고정시킨 상태에서 폴리올과 이소시아네이트의 유량 변화에 따른 혼합특성을 해석하였다.

Fig. 16 은 폴리올 및 이소시아네이트의 유량이 각각 0.7 g/sec, 1.3 g/sec 로서 매우 느린 경우에 대한 폴리올의 혼합비를 나타내고 있으며, Fig. 17 은 폴리올의 유량을 3.5 g/sec, 이소시아네이트의 유량

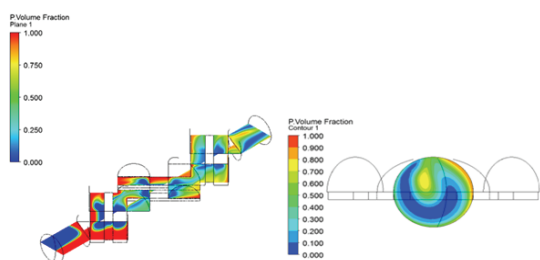


Fig. 16 Volume fraction of polyol (mass flow rates of polyol and isocyanate: 0.7 g/sec, 1.3 g/sec)

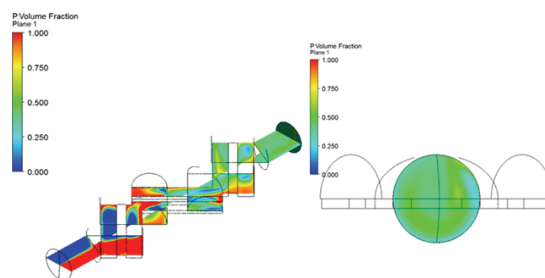


Fig. 18 Volume fraction of polyol for low-viscosity PUR

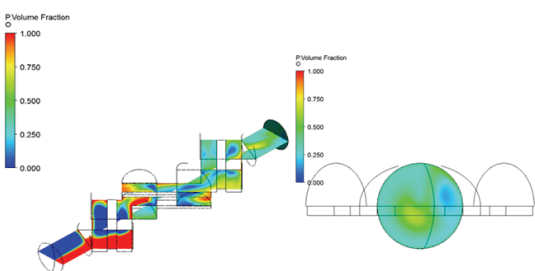


Fig. 17 Volume fraction of polyol (mass flow rates of polyol and isocyanate: 3.5 g/sec, 6.5 g/sec)

에서 각각 170 cps, 75 cps 이고, 밀도는 각각 1.118 g/ml, 1.17 g/ml 이며, 폴리올과 이소시아네이트의 혼합비는 100:130 을 적용하였다. 폴리올과 이소시아네이트의 유량을 각각 4.35 g/sec, 5.65 g/sec 로 유지시키고 저점도 소재를 적용한 경우에 대한 해석결과가 Fig. 18 에 나타나 있다. 경화제인 이소시아네이트의 점도가 320 cps 에서 75 cps 로 낮아짐으로 인하여 동일한 유량을 적용한 결과인 Fig. 17 에 비하여 혼합이 매우 균일하게 이루어짐을 알 수 있다. 그리고 소요되는 주입압력은 42 bar 로서 인몰드 코팅 성형에 문제가 없는 것으로 판단되었다.

을 6.5 g/sec 로 해석한 결과이다. 위에서 폴리올 및 이소시아네이트의 유량이 각각 7 g/sec, 13 g/sec 일 때의 결과인 Fig. 15 와 함께 비교해 보면 유량이 커질수록 난류 운동에너지의 증가로 인하여 혼합이 더욱 균일하게 이루어지는 것을 알 수 있다.

폴리올 및 이소시아네이트의 유량이 각각 3.5 g/sec, 6.5 g/sec 인 경우 주입압력은 55 bar 로서 이액형 폴리우레탄 주입장치의 최대압력 100 bar 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 폴리올 및 이소시아네이트의 유량이 각각 7 g/sec, 13 g/sec 일 때의 결과인 Fig. 15 에 비하여 혼합이 충분히 균일하지 못함을 알 수 있다.

3.4 점도

폴리올과 이소시아네이트의 유량을 더욱 증가시키면 혼합특성을 향상시킬 수 있지만, 요구되는 주입압력이 커지고 금형 안에서 기포발생이 많아지는 문제가 있다. 따라서 유량을 빠르게 증가시키지 않으면서 점도가 낮은 소재를 사용할 경우에 대한 혼합특성을 해석하였다.

사용한 소재는 Votteler 사에서 제조한 저점도 Puriflow(Polyol: PU993RK1V, Isocyanate: PU955HE0V)이며, 폴리올과 이소시아네이트의 점도는 80℃ 조건

4. 결론

이액형 폴리우레탄 소재를 적용한 인몰드 코팅을 구현하기 위하여 믹싱헤드를 설계하였으며, 금형 러너형상, 코팅제 유량, 점도 등이 폴리올과 이소시아네이트의 혼합 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 직선형 믹싱헤드를 적용할 경우 폴리올과 이소시아네이트가 제대로 섞이지 않으며, 금형에서 애프터믹서 역할을 할 수 있도록 러너 형상을 설계하여 균일한 혼합을 충족시키는 것이 필요하다.

(2) 러너형상은 원형 단면에 비하여 반원형 단면 형상이 균일한 혼합을 이루는데 더욱 바람직한 것으로 나타났다.

(3) 러너 길이가 증가할수록, 그리고 코팅제의 유량이 증가할수록 혼합이 더욱 균일하게 이루어졌다.

(4) 코팅 주입 압력 및 기포 발생을 감소시키기 위하여 코팅제 유량을 제한하는 것이 필요했으며, 이때 점도가 낮은 코팅제를 사용하여 주입 압력을 줄이고, 폴리올과 이소시아네이트의 혼합특성을 더욱 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 10040061).

참고문헌

1. Zuyev, K. S. and Castro, J. M., "Applications of chemo-rheology to develop process windows in reactive in-mold coating," *Journal of Polymer Engineering*, Vol. 22, No. 4, pp. 233-260, 2002.
2. Zuyev, K. S. and Castro, J. M., "Processing studies in reactive in-mold coating for thermoplastic parts," *SPE ANTEC'03*, pp. 510-514, 2003.
3. Rios, M. C., "Multiple criteria optimization studies in reactive in-mold coating," Ph.D. Thesis, Industrial and Systems Engineering, The Ohio State University, 2002.
4. 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.
5. Gruber, M., "Integrated system for producing composites," KraussMaffei Technologies, US Patent, No. 0317893, 2008.
6. Gruber, M., "Method for producing a coated composite component," KraussMaffei Technologies, US Patent, No. 0243148, 2009.
7. Tucker, C. L. and Suh, N. P., "Mixing for reaction injection molding. I. Impingement mixing of liquids," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 20, No. 13, pp. 875-886, 1980.
8. Tucker, C. L. and Suh, N. P., "Mixing for reaction injection molding. II. Impingement mixing of fiber suspensions," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 20, No. 13, pp. 887-898, 1980.
9. ANSYS Inc., "ANSYS CFX User's Manual," 2010.
10. RIM Manufacturing, LLC, "RIM Part and Mold Design," www.rimmfg.com