

폴리우레탄 발포 노즐 형상이 혼합 성능에 미치는 영향

Influences of Polyurethane Nozzle Shape on Mixing Efficiency

김도연¹, 이태경¹, 정해도², 김형재^{1,✉}
Do Yeon Kim¹, Tae Kyung Lee¹, Hae Do Jeong², and Hyoung Jae Kim^{1,✉}

¹ 한국생산기술연구원 정밀가공제어그룹 (Precision Manufacturing & Control R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

² 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National University)

✉ Corresponding author: hyjakim@kitech.re.kr, Tel: +82-51-974-9257

Manuscript received: 2015.9.22. / Revised: 2015.10.5. / Accepted: 2015.10.8.

For reaction injection molding (RIM) polyurethane was mixed in the mixing head by impingement mixing, injected into the mold, and cured quickly, as soon as the mold is filled. The shape of the nozzle in the mixing head is critical to improve the quality of polyurethane. To achieve homogeneous mixing, an intensive turbulence energy in the mixing nozzle is essential. In this study, a mixing nozzle for RIM was designed, and mixing efficiency was investigated based on experiment. Experiments were conducted with different combinations of nozzle tips and exit diameter to measure the mixing efficiency by measuring jet force and investigating mixing image with high speed camera. Jet force increased gradually and reaches steady state conditions. The jet force depended on shape of nozzle tip and outlet sizes. These results suggest that optimized nozzle configurations are necessary for high efficiency mixing with RIM.

KEYWORDS: Reaction injection molding (반응 사출 성형), Mixing head (믹싱 헤드), Mixing nozzle (믹싱 노즐)

1. 서론

반응사출성형(Reaction Injection Molding, RIM)은 반응물 또는 폴리머를 챔버(Chamber) 내에서 고속 충돌시켜 짧은 시간 내에 혼합 반응시키는 공정으로 대표적 적용 분야는 폴리우레탄 발포이다. 폴리우레탄은 폴리올(Polyol)과 이소시아네이트(Isocyanate)를 서로 다른 노즐에서 고속으로 분사하여 혼합용기 내에서 충돌 혼합 후 발포하여 경화과정을 통해 성형된다.¹ 폴리우레탄 성형을 위한 반응사출성형은 수 분 이내의 짧은 혼합과정을 걸쳐 금형 내부로 발포 하기 때문에 혼합성능 및 발포 성능이

중요하다.²

특히, 폴리우레탄 품질은 공정변수인 온도, 압력, 유량 등의 영향과 믹싱 헤드(Mixing head)의 혼합 및 발포 성능에 따라 결정된다.³ 폴리우레탄 발포에 사용되는 믹싱 헤드 구조는 Fig. 1과 같은 구조로 폴리올과 이소시아네이트를 분사할 수 있는 두 개의 노즐부와 충돌 혼합 공정이 발생하는 혼합 챔버(Mixing chamber), 그리고 혼합물이 발포되는 출구부로 구성되어 있다. 노즐부의 성능을 결정하는 인자는 노즐 홀더(Nozzle holder) 형상, 노즐 니들 팁(Nozzle needle tip) 직경, 노즐 콘(Nozzle cone) 출구 직경 등을 들 수 있다.⁴

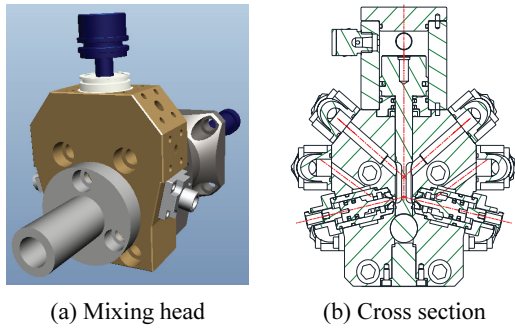


Fig. 1 3D & cross section geometry of mixing head

반응사출성형에 관한 연구는 공정 조건 변화에 따른 혼합 성능과, 충돌 혼합 후 혼합 균일도 분석에 대한 연구들이 진행되었으며, 노즐 형상에 따른 분사 및 혼합 특성에 대한 연구는 미비한 실정이다.

Kolodziej⁵은 반응사출성형의 혼합 균일도를 분석하는 연구에서 혼합 챔버 내부의 유체 충돌 후 발생하는 유동장 특성과 혼합 균일도와의 상관계를 제시하였다. Erkoç⁶은 CFD를 이용하여 혼합 균일도를 분석하였으며, 이 연구로부터 혼합 균일도 분석을 위해 유동자의 압력 편차가 주요 변수임을 밝혔다. Santos^{7,8}는 PIV(Particle Image Velocimetry)와 LDA(Laser Doppler Anemometry)을 이용하여 유동장 거동을 분석하고, CFD를 이용하여 물질이동과 화학반응 분석을 통해 유체 혼합에 영향을 미치는 인자를 제시하였다. Tucker^{9,10}는 믹싱 헤드 구조를 설계하고 혼합 과정을 예측하고 분석하는 연구를 진행하였으며, 혼합 효율을 높이기 위해 애프터믹서(aftermixer) 사용 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 반응사출성형에서 사용되는 노즐의 혼합성능 향상을 위한 분사 노즐 형상을 설계하였다. 또한 설계 된 노즐 형상의 혼합 성능을 가시화 실험을 통해 분석하였다.

2. 실험조건

본 실험에서는 믹싱 헤드의 분사력과 혼합 성능을 가시화 할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. 이를 위하여 Fig. 2의 노즐 형상에 따라 분사되는 유체의 분사력 측정을 위해 힘 센서를 장착하였으며, 이 때 분사 유량도 같이 측정하였다.

또한 초고속 카메라를 이용하여 노즐 형상에 따른 혼합 챔버(Mixing Chamber) 내에서 혼합 현상 및 혼합 효율을 측정하였다.

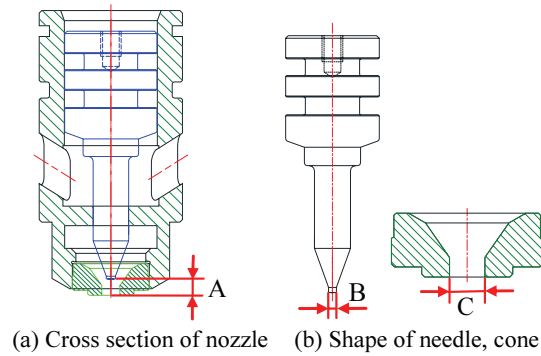


Fig. 2 Nozzle of mixing head design parameters

Table 1 Experimental conditions

Needle distance from outlet (A)	1, 2, 3mm
Diameter of nozzle needle tip (B)	Ø1, 1.5, 1.8, 2.0mm
Nozzle exit diameter (C)	Ø1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0mm
Density of mixing fluid	0.864kg/ℓ
Viscosity of mixing fluid	40cp
Pumping pressure	40bar

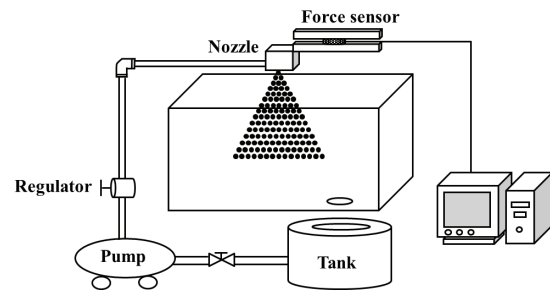


Fig. 3 Jet force measurement setup with nozzle

2.1 노즐 분사력 측정

Fig. 3에 나타난 것과 같이 힘 센서를 이용하여 노즐의 분사력을 측정하였다. 이 실험에 사용된 힘 센서는 Kistler사의 9147B를 사용하였으며, 노즐에서 유체 분사 시 발생하는 힘을 Fig. 4와 같은 지렛대 원리를 이용하여 측정하였다.

이러한 방법은 노즐 분사력을 직접적으로 측정하는 방식에 비해 힘을 증폭하여 측정할 수 있어 외력 및 실험 장비 구조에 의한 측정 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 실험에 사용한 노즐의 형상 및 다른 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용한 유체는 실제 공정에서 사용되는 유체와 유사한 점도를 가진 유체를 사용하였다.

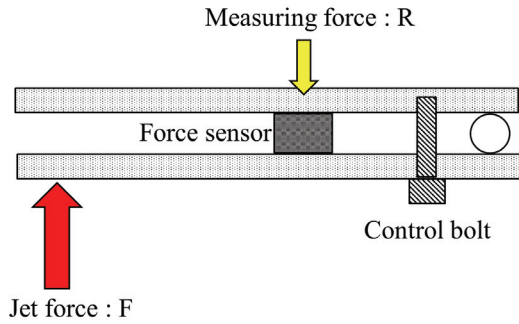


Fig. 4 System configuration of measuring jet force

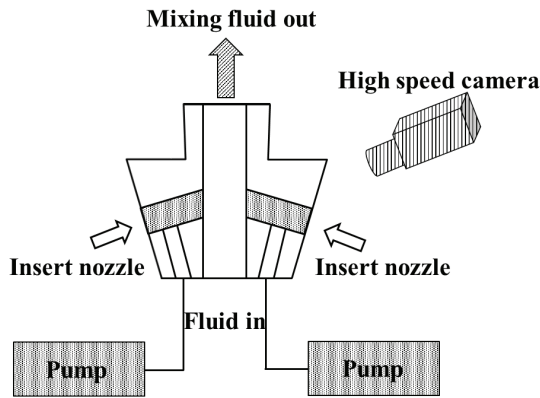


Fig. 5 System configuration of mixing efficiency measurement

2.2 혼합 성능 측정

믹싱 헤드에서 유체 혼합 효율에 영향을 미치는 물성은 유체의 온도, 점도, 압력 등 매우 다양하다.¹¹ 그러나 이것은 공정 설계에서 고려해야 할 인자들이며, 일반적으로 믹싱 헤드에서 혼합 효율은 노즐에서 분사 되는 유체가 혼합 챔버 내에서 균일하게 혼합되는지가 중요한 부분이며, 이 때 노즐 니들 직경과 출구 직경이 혼합 효율에 영향을 미치는 중요한 변수로 작용한다.¹² 따라서 본 실험에서는 노즐 니들과 출구 직경에 따른 믹싱 챔버 내에서 혼합 과정을 측정하였다.

각 노즐에서 분사 되는 유체의 혼합현상을 측정하기 위해 동일한 점도의 무색인 두 유체 중 한 유체에는 색을 첨가해 혼합과정을 관찰하였다.

특히, 혼합 과정은 수 초 내의 짧은 시간에서 일어나는 현상으로 육안 관찰이 어려워 Optronis사의 CR3000x2 초고속 카메라를 이용하여 관찰 하였다. 각 실험은 분사가 균일하게 이루어지는 시점부터 측정을 진행하였다.

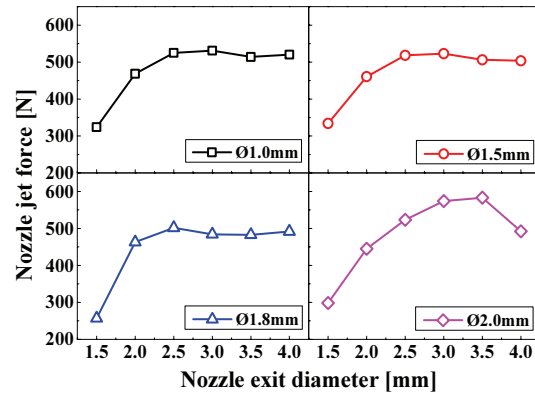


Fig. 6 Nozzle jet force characteristic with nozzle exit diameter and needle diameter

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노즐 형상에 따른 분사력 측정

반응사출성형에 사용되는 믹싱 헤드의 혼합 성능에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 레이놀즈 수 (Reynolds numbers)로 레이놀즈 수는 $Re = \rho v d / \mu$ 로 정의할 수 있으며, d는 노즐 직경, v는 노즐에서 분사는 유체 유속, ρ는 유체 밀도, 그리고 μ는 유체의 점도를 나타낸다.¹³ 레이놀즈 수가 낮을 경우 난류가 형성 되지 않아 유체의 혼합이 제대로 이루어 지지 않는다.¹⁴ 이 때 레이놀즈 수는 유체 속도에 비례하며 실험에서는 노즐 형상에 따른 분사 속도를 상대 비교하기 위해 분사력을 측정하였다. Fig. 6은 노즐의 형상에 따른 분사력을 나타낸 것으로 노즐 출구 직경이 커질수록 분사력이 커지는 경향을 보인다. 하지만 출구 직경이 3mm 이상 결과에서는 분사력이 일정한 결과를 보이고 있다. 이러한 노즐 출구 직경에 따른 분사력 변화는 출구 직경이 작은 초기 구간에서는 레이놀즈 수 감소로 혼합 효율이 떨어질 수 있음을 보이며 혼합 효율을 높이기 위해서는 3mm 이상의 출구직경을 가져야 하는 것을 알 수 있다. 실험에 사용한 오리피스 형태의 노즐에서는 출구의 면적이 작아지면서 압력 감소가 발생한다.

이 때 노즐 내부 공급 압력과 분사 압력이 평형을 이루는 시점에서 분사력 편차 폭이 작아지게 된다. 이러한 특성은 Fig. 7의 유량 결과에서도 동일한 현상을 보인다. 노즐 출구 직경이 커지면 분사 유량도 함께 증가하지만, 출구 직경이 3mm, 3.5mm 에서는 더 이상의 유량 증가 없이 일정한

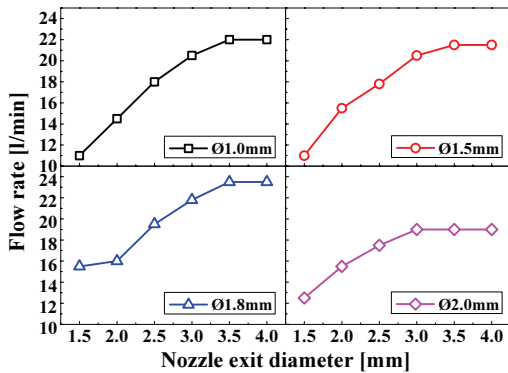


Fig. 7 Flow rate characteristic with nozzle exit diameter

값을 보인다. 이러한 노즐 니들과 출구 직경 변화에 따른 유체 분사력과 유량 결과는 니들 직경과 출구 직경에 비례한 결과를 보인다. 하지만, 분사력과 유량 증가는 특정 노즐 형상 크기에서 변화폭이 작아지기 때문에 형상 변화에 의한 혼합 효율 증가는 한계성을 가지는 것으로 판단된다. 따라서 혼합 효율을 증가 시키기 위해서는 노즐 성능뿐만 아니라 공정 조건의 최적화도 필요할 것으로 판단된다.

3.2 노즐 형상에 따른 혼합 성능

믹싱 헤드의 가장 중요한 역할은 각 노즐에서 분사되는 유체를 혼합 챔버 내에서 균일 혼합하여 발포하는 것으로 노즐의 분사력과 챔버 내에서의 혼합 과정이 중요하다. Santos¹⁵ 의해 알려진 바와 같이 혼합 성능은 믹싱 노즐뿐만 아니라 챔버에 의한 영향도 크게 받는다.

본 실험에서는 실험을 통해 설계한 노즐을 이용하여 실제 챔버 내에서의 혼합성능을 측정하였다. 노즐 출구 직경은 실험 결과에서 가장 높은 분사력을 보인 3mm로 고정하였다.

Figs. 8과 9는 노즐 니들 직경이 1.5mm, 2.0mm 일 때 노즐 니들 위치에 따른 혼합 성능을 측정된 것이다.

니들의 위치가 출구와 가까운 Fig. 8(a) 경우 혼합 현상이 유체가 충돌하는 부분에서 이루어지지만, Figs. 8(b)와 8(c)는 챔버 전 구간에서 혼합이 일어난다. 그러나, 노즐 니들 직경이 2.0mm인 Fig. 9에서는 모든 위치에서 균일 혼합이 일어난다는 것을 볼 수 있다.

혼합 챔버 내 혼합 균일도를 분석하기 위해 포토샵(Photoshop)을 이용하여 혼합영역 부분 측정 이미지의 그레이 스케일 히스토그램(Histogram)을 분석하여 표준편차를 계산하였다.

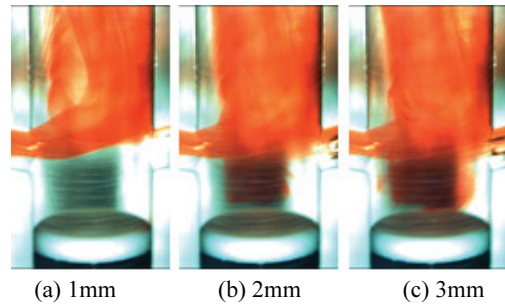


Fig. 8 Mixed flow image with diameter of nozzle needle tip 1.5mm and nozzle exit diameter 3.0mm at nozzle needle distance from outlet 1, 2 and 3mm

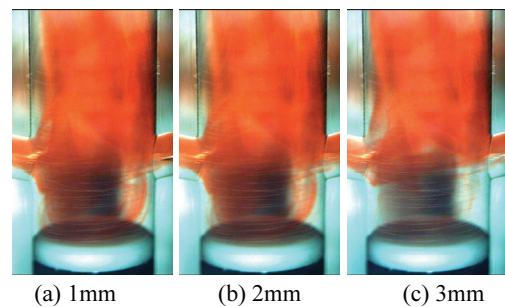


Fig. 9 Mixed flow image with diameter of nozzle needle tip 2.0mm and nozzle exit diameter 3.0mm at nozzle needle distance from outlet 1, 2 and 3mm

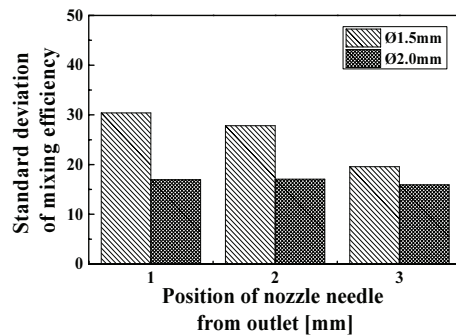


Fig. 10 Standard deviation of mixing efficiency at nozzle distance from outlet 1, 2 and 3mm

Fig. 10 나타낸 것과 같이 노즐 니들 직경 1.5mm에서는 혼합 면적이 가장 넓은 니들 위치 3mm에서 가장 낮은 균일도 편차 값을 보였다.

노즐 니들 직경이 2.0mm에서는 모든 노즐 니들 위치에서 균일한 혼합 특성을 보인다. 따라서

혼합 챔버 내 넓은 영역에서 혼합이 일어 날 때 균일도가 향상되는 것으로 판단된다.

4. 결론

반응사출성형에 사용하는 믹싱 헤드의 혼합 효율을 높이기 위해 노즐을 설계하였다. 설계한 노즐의 성능을 평가하기 위해 분사력과 유량 측정하였다. 노즐의 니들 팁 직경과 출구 직경이 커질수록 분사력은 증가하였으나, 노즐 출구 직경이 3mm 이상에서는 증가폭이 급격히 작아지면서 이후 일정한 분사력과 유량 결과를 보였다. 이러한 결과는 믹싱 헤드의 혼합 효율이 레이놀즈 수에 비례하는 선행 연구 결과에서와 같이 분사력 증가로 인해 점차 혼합 효율이 좋아지지만 노즐 출구 직경이 3mm 이후부터는 큰 편차가 없다는 것을 알 수 있다.

설계된 노즐의 혼합 효율 가시화 실험에서는 분사력이 가장 큰 노즐 니들 팁 직경 2mm에서 혼합 효율이 좋은 것으로 관찰되었다. 두 유체가 혼합 챔버 내에서 충돌 혼합하는 과정에서 높은 분사력에 의한 충돌로 넓은 영역으로 혼합 과정이 이루어지면 균일 혼합이 이루어지는 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Youn, J. W. and Kim, H. S., "A Study on Foaming Characteristics of Polyurethane Reaction Injection Molding Using Cup Foam Test," Proc. of KSTP Autumn Conference, pp. 106-109, 2008.
2. Kwon, J. W. and Lee, D. G. "Cure Monitoring for Prototyping of Reaction Injection Molding," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 32-36, 2001.
3. Lee, H. S. and Kim, D. M., "A Study on Mixing Characteristics of Two-Component Polyurethane for In-Mold Coating," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 3, pp. 317-323, 2013.
4. Rho, B. J., Jeung, W. T., Lee, S. J., and Kim, S. M., "Flow Characteristics of High Pressurized Jet with Aspect Ratio," Proc. of KSME Autumn Conference, pp. 717-722, 2003.
5. Kolodziej, P., Macosko, C. W., and Ranz, W. E., "The Influence of Impingement Mixing on Striation Thickness Distribution and Properties in Fast Polyurethane Polymerization," Polymer Engineering & Science, Vol. 22, No. 6, pp. 388-392, 1982.
6. Erkoç, E., Santos, R. J., Nunes, M. I., Dias, M., and Lopes, J. C. B., "Mixing Dynamics Control in Rim Machines," Chemical Engineering Science, Vol. 62, No. 18, pp. 5276-5281, 2007.
7. Santos, R. J., Teixeira, A. M., and Lopes, J. C. B., "Study of Mixing and Chemical Reaction in Rim," Chemical Engineering Science, Vol. 60, No. 8, pp. 2381-2398, 2005.
8. Santos, R., Teixeira, A., Costa, M., and Lopes, J., "Operational and Design Study of Rim Machines," International Polymer Processing, Vol. 17, No. 4, pp. 387-394, 2002.
9. Santos, R. J., Erkoç, E., Dias, M. M., Teixeira, A. M., and Lopes, J. C. B., "Hydrodynamics of the Mixing Chamber in Rim: Piv Flow-Field Characterization," AIChE Journal, Vol. 54, No. 5, pp. 1153-1163, 2008.
10. Tucker, C. L. and Suh, N. P., "Mixing for Reaction Injection Molding. I. Impingement Mixing of Liquids," Polymer Engineering & Science, Vol. 20, No. 13, pp. 875-886, 1980.
11. Tucker, C. L. and Suh, N. P., "Mixing for Reaction Injection Molding. II. Impingement Mixing of Fiber Suspensions," Polymer Engineering & Science, Vol. 20, No. 13, pp. 887-898, 1980.
12. Nguyen, L. T. and Suh, N. P., "Processing of Polyurethane/Polyester Interpenetrating Polymer Networks by Reaction Injection Molding (Rim). Part I: Design of a High Pressure Rim System," Polymer Engineering & Science, Vol. 26, No. 12, pp. 781-798, 1986.
13. Nguyen, L. T. and Suh, N. P., "Processing of Polyurethane/Polyester Interpenetrating Polymer Networks by Reaction Injection Molding. Part II: Mixing at High Reynolds Numbers and Impingement Pressures," Polymer Engineering & Science, Vol. 26, No. 12, pp. 799-842, 1986.
14. Nguyen, L. T. and Suh, N. P., "Processing of Polyurethane/Polyester Interpenetrating Polymer Networks by Reaction Injection Molding. Part III: Flow Reorientation through Multiple Impingement," Polymer Engineering & Science, Vol. 26, No. 12, pp. 843-853, 1986.
15. Santos, R. J., Erkoç, E., Dias, M. M., and Lopes, J. C. B., "Dynamic Behavior of the Flow Field in a Rim Machine Mixing Chamber," AIChE Journal, Vol. 55, No. 6, pp. 1338-1351, 2009.