

수치해석을 이용한 코스메틱용 스프레이 미립화를 위한 부품설계 및 금형 설계에 관한 연구

서형진¹ · 손창우¹ · 장영주¹ · 양우¹ · 서태일[†]

인천대학교 기계공학과^{1,†}

A study about design of main parts and injection molds for atomization of cosmetic spray using finite element method

Hyoung-Jin Seo¹ · Chang-Woo Son¹ · Young-Ju Jang¹ · Woo Yang¹ · Tae-II Seo[†]

Department of Mechanical Engineering, Incheon National University^{1,†}

(Accepted May 28, 2015)

Abstract : This paper presented characterization of spray velocity and angle of spray nozzle systems for cosmetic products. Diameter and length of nozzle orifice were chosen as shape factors of the spray system. Spray orifice of the spray pattern is a factor influencing the quality of the product. Fluid analysis was conducted by using “Fluent” to obtain spray angle and velocity. RSM (Response Surface Method) was used to approximate the relationship between these 2 factors and spray characteristics. To evaluate the proposed method, experimental work with existing was conducted and good agreement between simulation and experimental results.

Key Words : Spray Angle, Water Atomization, Simulation, FEM, Design of Experiment, Response Surface Approximation.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 화장품 시장이 거대해지고 소득 증가에 따른 소비 활동 증대 및 고령화 사회로 인해 미용에 대한 관심증가로 인해 미래의 유망산업으로 분류되고 있다. 이에 관련하여 화장품의 품질과 생산성을 향상시키기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 특히 주요 부품 중에 하나인 스프레이 펌프는 화장품의 품질과 직접적으로 관련 있는 매우 중요한 부품이다. 스프레이 펌프는 용기 내의 내용물을 미립화 상태로 분사하여 토출시키는 역할을 수행한다.

액체미립화란 무화라고도 하며, 어떤 양의 액체를 어떤 목적을 위해 다수의 액적 또는 입자로 생성시키는 기술을 의미한다. 분무는 미세한 액적이 분산되어 있는 상태를 말한다. 이러한 액체미립화는 대체로 수백 μm 부터 수 mm 까지의 분무나 분체의 생성을 대상으로 한다. 액체는 물에서부터 석유계 연료, 화장품 등의 생활용품, 의약품, 염료 비료, 금속 분말 등의 산업용품 등도 액체 상태에서 미립화 기술에 의해 분체로서 제조되기 때문에 이러한 물질의 액체상태도 포함된다. 이러한 액체 미립화 기기의 기술은 여러 가지 사업 분야에 적용되며 최종적으로는 장치의 성능향상, 품질향상, 경제성 향상을 실현하는 수단이다¹⁾.

1. 인천대학교 기계공학과

† 교신저자 : 인천대학교 기계공학과

E-mail : tiseo@incheon.ac.kr



Fig. 1 Spray for cosmetics

노즐 형상의 각 인자에 따른 유동의 변화들이 분무 특성에 어떤 영향을 미치는지 파악하기 위해 많은 실험수행은 경제적으로 어려운 일이다. 이러한 실험적 연구는 화장품 용기에 사용되는 선회분사노즐의 경우 사출금형을 이용하여 제작되고 이와 같은 제작 방식으로 인해 잘못된 설계는 제품의 제작 비용을 상승시키는 요인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전산유체역학과 실험계획법을 이용하여 적은 비용과 노력으로 각 인자의 유동 기어를 예측하려는 시도가 있었다²⁴⁾.

본 연구의 목적은 화장품용 노즐의 형상변화에 따른 분무 특성 중 오리피스 형상에 따른 분무각 및 분무속도의 변화를 VisualDOC의 반응표면법을 이용한 함수값을 도출하고자 하며 유동장 해석 프로그램인 ANSYS Fluent[®]를 이용하여 수치해석값과 실험값을 비교해 보고자 한다. 또한, 사출성형 해석 프로그램인 Moldflow를 이용하여 주요 부품의 사출 성형 및 설계를 통해 고품질 및 고생산성을 갖는 최적의 금형을 설계하고자 한다.

2. 실험계획법 및 수치해석

2.1. 노즐 형상

본 논문에서 연구하고자 한 대상은 얼굴 분사용 화장품에 들어가는 내부 노즐이다. Fig. 2는 내부 노즐의 수로를 모델링한 모습이다. 이 노즐은 압력분사노즐이란 압력에너지를 속도에너지로 변환하여 액체와 주위 기체 사이의 상대속도에 미립화하는 형식의 분사노즐이다. 고압 상태의 액체가 직경이 작은 노즐을 통과할 때 액체 스스로가 갖는 불안정성이나 대기와의 상호작용에 의해 액체의 미립화가 진행된다.

노즐 내 부품 중 와류분사밸브는 선회실을 중심으로 유입구와 유출구로 나뉘어져 있다. 유입구는 액체가 빠른 속도로 선회하도록 접선방향 단면으로 되어 있으며 유출구는 선회실의 중심축상의 출구쪽에 원형의 오리피스로 설계되어있다. 외부에서 액체가 와류실로 접선방향으로 유입될 때, 액체는 와류실을 선회하며 가속되고, 출구 오리피스를 통해 분사되어 원추형태의 중공분무를 형성한다.

얼굴 분사에 이용되는 화장품의 노즐 작동 조건은 입구부에서의 속도 0.1m/s로 주었으며 출구부는 대기압 상태이다.



Fig. 2 Flow field 3d-modeling

2.2. 수치해석기법

얼굴 분사용 화장품에 이용되는 노즐의 경우 고압과 복잡한 형상으로 3차원 비압축성 해석을 필요로 한다. 본 연구의 수치해석에서는 노즐 내부의 유동장 해석을 위하여 비압축성 3차원 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였으며 범용 유동해석 프로그램인 Fluent를 선정하여 노즐 내부의 분무 유동에 특성에 맞는 해석을 수행하였다. 계산에 사용된 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 되었다.

경계조건의 경우 입구부에서는 균일한 속도인 0.1m/s로 물이 유입하고, 출구부는 대기압을 고정시켜 해석을 수행하였고, 작동유체는 25°C의 물을 사용하였다. 노즐 형상의 경우 비정렬 격자계를 사용하여 격자를 구성하였으며, 격자의 개수는 약 31만 개를 사용하였다. Fig. 3은 내부 수로의 메쉬 기능을 적용한 그림이다.



Fig. 3 Mesh of pressure swirl nozzle

해석 수행 결과 Fig. 4의 그림과 같이 유동의 벡터를 확인할 수 있다. 각각 오리피스 길이가 0.4mm, 0.5mm, 0.6mm로 증가함에 따라서 벡터의 폭이 작아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5와 6은 유속의 시물레이션 결과로 오리피스의 길이가 길어짐에 따라서 속도는 Table 1과 같이 점차 작아짐을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of Injection angle and velocity

No.	Orifice length	FEM velocity	Injection angle
1	0.4mm	4.425m/s	16°
2	0.5mm	4.403m/s	13°
3	0.6mm	4.324m/s	10°

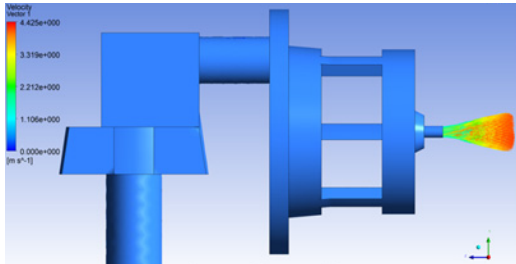


Fig. 4 Flow 3d-modeling and CFD example

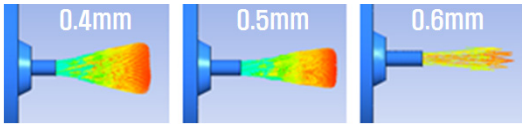


Fig. 5 Stream vector according to orifice length

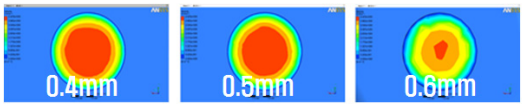


Fig. 6 Stream velocity according to orifice length

2.3. 반응표면함수

반응표면분석이란 여러 개의 설명변수가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화를 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다.

여기서 설명변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 말하고, 반응변수는 설명변수의 영향을 받아서 어떤 반응을 나타내는 종속변수를 뜻한다. 본 논문에서는 오리피스 노즐의 직경을 0.25mm로 고정하고 변화길이는 0.4, 0.5, 0.6mm로 한정하여 변화를 주었다. 이 때 분무각의 변화를 확인하고 노즐 길이에 따른 분무각의 변화 예측을 위해 반응표면 함수를 도출하였다.



Fig. 7 Injection angle according to orifice length

실제 초고속카메라 실험을 통하여 분무각을 측정한 결과 Fig. 7과 FEM결과처럼 길이가 길어짐에 따라 점차적으로 각도가 작아짐을 확인하였다. 오리피스의 길이, CFD의 속도를 설계변수로 하고 분사각을 목적함수로 두어 식을 만들었을 때 식은 아래와 같다.

$$\text{Injection angle} = -30.000[L] + -3.8168e-014[V] + 28$$

(L = Orifice length, V = FEM velocity)

위 반응함수를 통하여 분사각을 알 수 있고 이를 통하여 스프레이 오리피스 설계 시 초기 자료로 이용할 수 있다.

3. 사출 성형 해석을 통한 금형 설계

3.1. 부품의 사출 성형

스프레이의 성능에 매우 중요한 역할을 하는 오리피스와 오리피스 바디의 경우 그 표면의 품질이 매우 중요하다. 부품의 정밀도는 내부 수로의 압력을 높이는 역할과 유체의 미립화를 이루게 하는 중요한 요소이며 외형에 흠집이나 웰드라인이 생길 시 이 같은 작용을 저하시켜 결국 품질이 저하된다. 사출 시 생기는 문제점인 수축, 웰드라인, 플로우마크 등 중 표면 품질에 가장 중요한 요소인 웰드라인을 중점적으로 수행하였다⁸⁻¹⁰. Fig. 8과9는 해석에 사용했던 오리피스와 오리피스 바디의 2D 도면이다.

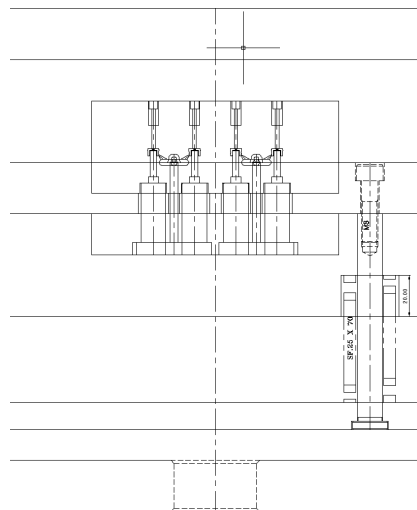


Fig. 8 Orifice 2d mold drawing

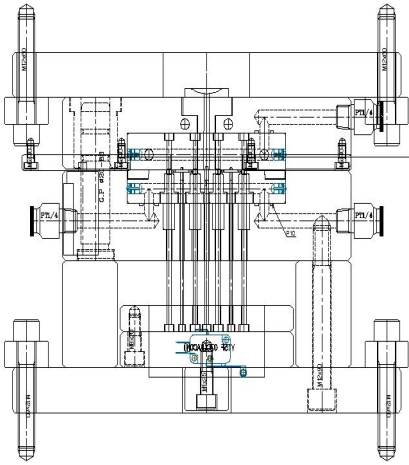


Fig. 9 Orifice body 2d mold drawing

3.2. 사출 해석 조건

부품의 사출 시 완충시간에 대해 해석을 진행하였으며 오리피스와 오리피스 바디에 대해 각각의 해석을 진행하였다. 오리피스와 오리피스 바디의 웰드라인에 미치는 여러 인자 중 게이트의 직경과 출구 직경, 사출시간 세 요소를 변수로 두어 여러 가지 유형에 대해 해석을 수행하였다. Table 2는 각 조건을 나타낸 표이다.

Table 2 Orifice and orifice body injection analysis conditions

Type		Gate entrance size	Out-put size	Injection time
Orifice	Case 1	3mm	0.2mm	1s
	Case 2	3mm	0.2mm	0.8s
	Case 3	3mm	0.3mm	0.5s
	Case 4	3mm	0.3mm	0.3s
Orifice body	Case 5	4mm	0.4mm	0.5s
	Case 6	4mm <td 0.4mm	0.3s	
	Case 7	4mm	0.4mm	0.2s

3.3. 사출 해석 결과

오리피스의 사출 해석 결과로 게이트 직경 3mm, 출구 직경 0.3mm, 사출시간을 0.3초로 하였을 때인 Case 4의 경우가 Case 1에 비해 웰드라인이 반으로 줄어드는 현상을 알 수 있었으며 사출시간 또한 감소함을 알 수 있었다. 또한, 제품의 웰드라인이 유로가 통과되는 부분이 아닌 부품과의 접촉면에 발생하여 성능에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. Fig. 10은 해석 시 선정하였던 냉각 채널의 모습이며 Fig. 11은 Case 4 조건의 사출시간과 웰드라인의 모습이다.

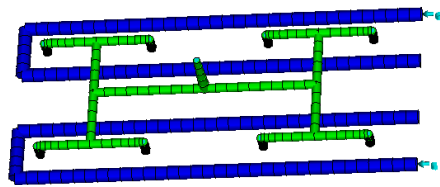
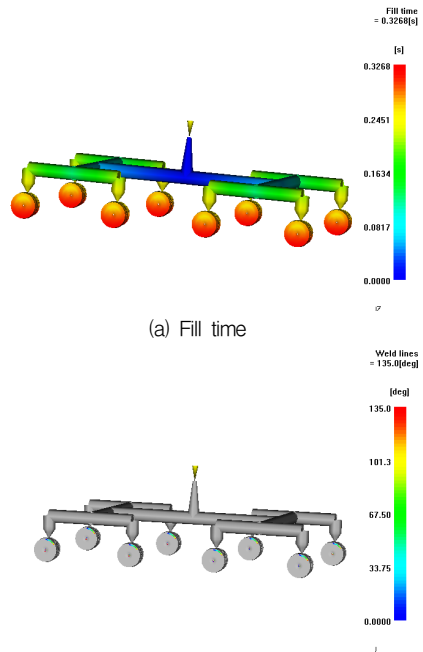


Fig. 10 Cooling channel of orifice mold

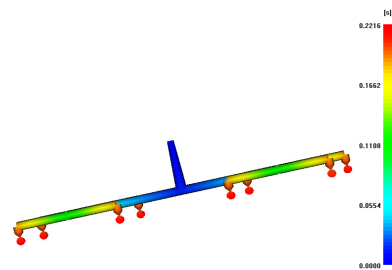


(a) Fill time

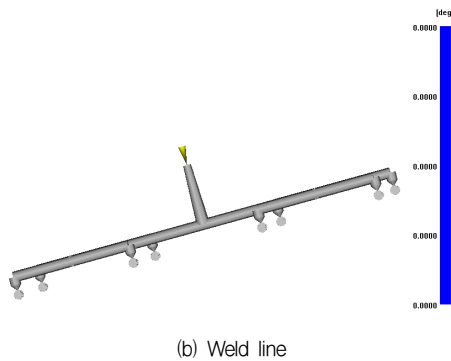
(b) Weld line

Fig. 11 Orifice analysis results (gate entrance size 3, out-put size 0.3mm, injection time 0.3s)

오리피스 바디의 사출 해석 결과 모든 조건하에서 웰드라인이 없어진 것을 볼 수 있었으며 부품의 생산성을 고려하여 Case 7이 가장 적합한 사출 조건이다. Fig. 12는 오리피스 바디의 사출시간과 웰드라인을 나타낸 그림이다.



(a) Fill time



(b) Weld line
Fig. 12 Orifice body analysis results (gate entrance size 4, out-put size 0.4mm, injection time 0.2s)

4. 결론

초고속 카메라 실험을 통하여 분무각의 3포인트를 얻었으며 실제 CFD를 통하여 출구측 속도를 구하였다. 속도를 설계변수, 분무각을 목적함수로 하여 반응 표면 함수를 얻을 수 있었다. 이를 통하여 분사각의 변화를 알 수 있다. 이번 연구에서 얻은 결과를 통하여 스프레이 오리피스 설계 시 초기 자료로 이용할 수 있다. 직경을 고정하고 길이를 변화하였을 때 길이가 증가함에 따라 각도가 작아지는 반비례식이 도출되었다. 하지만 실험이 많지 않아 비례하는 식이 나왔으나 추후 연구를 통하여 보다 정확한 연구가 필요하다. 또한, 오리피스와 오리피스 바디의 사출 성형에 경우 기존 3가지 변수에서 고정변수를 게이트 직경으로 선정하였지만 고정변수 외의 요소로 바뀌 추후 연구할 필요가 있다. 오리피스 웰드라인의 경우 모든 Case에 발생하였는데 추후 연구를 통해 완전히 없앨 수 있는 방안이 필요하다.

후기

“본 연구는 보건복지부 보건의료연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임.(과제고유번호 : A103017)”

참고문헌

1) Heung Shin Jeon, Liquid Atomization, pp. 1-12., 2009.

2) Thomas Hörmann, Daniele Suzzi, Siegfried Adam and Johannes G. Khinast, "DOE-Based CFD Optimization of Pharmaceutical Mixing Process", J Pharm Innov, Vol. 7, pp. 181-194, 2012.

3) Evelyn Edith Gutiérrez-oppe, Wilson Miguel Salvagnini and Maria Elena Santos Taqueda, "Comparison between the design of experiments and simulation in the three-phase distillation in a sieve tray column for glycerine dehydration", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 91, Issue 7, pp. 1186-1202, 2013.

4) D. R. Gunasegaram, D. J. Farnsworth and T. T. Nguyen, "Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, Issue 3, pp. 1209-1219.

5) FLUENT Inc., "Fluent 6 User's Guide", Fluent Inc. Lebanon, 2011.

6) Wimmer, E. and Brenn, G., "Viscous flow through the swirl chamber of a pressure-swirl atomizer," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 53, pp. 100-113, 2013.

7) Lee, E. J., Oh, S. Y., Kim, H. Y., James, S. C. and Yoon, S. S., "Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a transparent acrylic nozzle at various Reynolds numbers," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34, Issue 8, pp. 1475-1483, 2010.

8) S. Hashemi, "Effect of temperature on weldline integrity of injection moulded short glass fibre and glass bead filled ABS hybrids", Polymer Testing, 29, pp. 327-336, 2010.

9) Babur Ozcelik, Emel Kuram, M. Mustafa Topal, "Investigation the effects of obstacle geometries and injection molding parameters on weld line strength using experimental and finite element methods in plastic injection molding", International Communications in Heat and Mass Transfer, 39, pp. 275-281, 2012.

10) S.O. Ogadhoh and T.D. Papanthasiou, "On Microstructure At The Weldline In Injection Moulded Particulate Composites", Scripta Materialia, Vol. 37, No. 8, pp. 1143-1149, 1997.