

연마가공 노즐의 성능개선을 위한 실험적 연구

이정재*, 홍천화*, 송명준**, 곽지영**, 이 열*^{#,}

*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부, **한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

Experimental Study of the Performance-Improvement of the Abrasive Blasting Nozzle

Jung-Jae Lee*, Cheon-Wha Hong*, Myoung-Joon Song**, Ji-Young Kwak**, Yeol Lee*^{#,}
*School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, **Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School, Korea Aerospace University
(Received 30 September 2016; received in revised form 23 December 2017; accepted 5 January 2017)

ABSTRACT

An experimental study has been carried out to improve the performance of a commercial abrasive blasting nozzle, by simply redesigning the nozzle's inner contour. The analytical 1-D code, that can evaluate both the frictional effects on the nozzle inner wall and the sphericity effects of the particle, is utilized to calculate the dynamics of the particle inside the nozzle. The analytical results are compared to the experimental ones, that were obtained from images of the particle streaklines downstream from the nozzle exit. It is noted that the particle velocity at the redesigned nozzle exit increases as compared to the original commercial nozzle.

Key Words : Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Abrasive Blasting(연마가공), Particle Acceleration(입자가속), Velocity Measurements(속도측정)

1. 서 론

작은 입자로 된 연마제를 작업표면에 충돌시킴으로서 표면의 이물질을 제거하는 연마가공장치는 대형 선박의 녹이나 이물질 제거에서부터 의치 및 보석의 정밀가공에 이르기까지 매우 다양한 산업분야에서 응용되고 있다. 단위시간 당 수행된 작업면의 크기로 평가되는 연마가공의 효율에 영향을 주는 주요 인자는 연마노즐 형상과 운용압력, 그리고 연마제의 종류와 크기 등 매우 다양하며, 오래 동안

국내외에서 관련 연구가 다수 수행되어 왔다.

유동장 내에 있는 작은 입자의 거동에 관한 기초 연구^[1]를 기반으로, Settles 등^[2-4]은 기존 노즐의 확대부를 보다 길게 설계함으로써 연마가공 노즐의 성능을 크게 개선할 수 있다고 한 바 있다. Li 등^[5] 또한 노즐 내부형상의 설계변화를 통하여 길이가 짧은 노즐로도 고밀도의 작업면 코팅이 가능함을 보인 바 있다. 배한진 등^[6]은 노즐형상 및 압력, 그리고 입자크기와 소비량 변화 등 다양한 운용조건에 대한 실험을 통하여 작업효율의 개선방법을 제시하였고, 이민욱 등^[7]과 권의혁 등^[8]의 연구에서도 노즐 내부에서의 입자거동과 작업면 충돌특성에 관한 수치해석적 연구가 진행한 바 있다. 일반적으로

Corresponding Author : ylee@kau.ac.kr

Tel: +82-2-300-0113, Fax: +82-2-3158-2191

고압조건에서 운용되는 연마노즐의 출구에서는 초음속 유동이 형성되며, 이에 Jodoin^[9]은 노즐출구 후방에서 나타날 수 있는 충격파가 입자거동에 미치는 영향을 연구한 바 있으며, 곽지영 등^[10]은 초음속 유동에서 무시할 수 없는 벽면마찰 효과를 고려한 1-D 해석코드를 개발하고 노즐 내부형상 변화를 통한 입자거동의 개선결과를 제시한 바 있다.

과거 Settles 등^[2,3]의 연구는 노즐의 설계과정과 입자거동, 그리고 실험절차에 관한 내용이 자세히 제시되지 않은 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 곽지영 등^[10]이 제시한 해석적 연구결과를 실험적으로 관찰하고 비교하기 위하여 노즐 출구에서의 입자 속도를 측정하여 보았다. 또한 전자현미경으로 관찰된 입자의 구형도(sphericity)를 평가하여 그 영향이 기 개발된 해석코드에서 추가 평가되도록 하였다. 기준노즐로 선택된 특정 상용노즐과 노즐 총길이 및 출구 마하수가 동일한 조건으로 개선노즐을 설계 제작한 후, 노즐출구에서 나타나는 입자 속도를 해석적 방법과 실험적 방법으로 관찰하여 서로 비교하였다. 이를 통하여 입자가속에 관한 개선노즐^[3]의 타당성을 정량적으로 제시하고, 추가로 입자 구형도가 입자거동의 해석과정에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 개선노즐 설계

본 연구에서 사용된 연마노즐 내부의 입자거동에 관한 해석코드^[10]는 단일 구형으로 가정된 입자에 작용하는 항력을 평가하고 이에 따른 입자의 가속 과정을 1차원적으로 계산한 것이다. Settles 등^[2]이 제시한 연마노즐의 설계개선의 주안점은 노즐 내부에서 가속되는 단일 구형입자에 작용하는 항력은 유동속도와 입자속도와의 차이에서 정의되는 상대마하수가 1.4 근처일 때 가장 크며, 따라서 초음속 노즐의 확대부를 가능한 길게 설계하는 것이 입자 가속에 도움이 된다는 것이다.

이러한 원리를 응용하여 본 연구에서 비교 관찰된 두 가지 노즐의 내부형상이 다음 Fig. 1에 제시

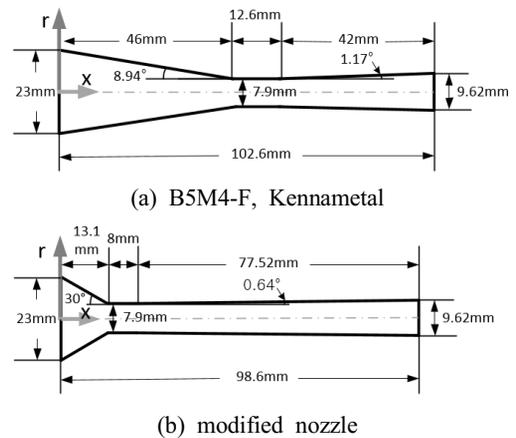


Fig. 1 Comparison of the nozzle geometry

되어 있다. Fig. 1의 (a)는 비교의 기준이 되는 상용노즐(B5M4-F, Kennametal)의 내부형상을 보여주고, Fig. 1의 (b)는 본 연구에서 설계 개선된 수정노즐(modified)의 내부형상을 나타내고 있다. 이때 두 노즐의 면적비(노즐출구 면적/노즐목 면적)는 1.48로 동일한 값을 가지며, 이에 따라 두 노즐의 설계마하수(isentropic)^[11]도 1.84로 서로 같다. 수정노즐은 상용노즐의 총길기와 거의 같게 설계되었고, 노즐 내부에서 초음속으로 가속되는 확대부 구간을 크게 늘리고, 그만큼 수축부 길이를 줄인 것이 특징이다.

2.2 실험장치 구성 및 방법

본 연구에서 응용된 실험장치의 개략도는 다음 Fig. 2와 같다. 압축기(KC203, Kohands)를 통하여 압축된 공기는 압력조절기를 거쳐 일정한 압력으로 연마재 혼합탱크(blast machine, SD-210, GATX)로 유입된다. 이곳에서 혼합된 연마재와 공기가 노즐을 통하여 가속되어 노즐출구 하류에 설치된 레이저 빔을 이용한 입자속도 측정부를 지나게 된다.

노즐출구에서 나타나는 입자속도의 평가는 디지털 카메라(CCE-B013-U, Mightex) 셔터의 일정한 노출시간(0.1ms) 동안 노즐 하류 중심면을 비추는 Laser light sheet을 지나는 입자궤적(streaklines)의 길이를 측정함으로써 이루어졌다. 얇은 두께(1mm

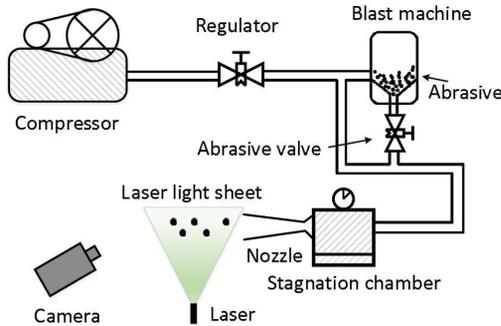


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

이하)의 부채꼴 형태의 Laser light sheet은 레이저 (5W, 532nm, Laserpointerpro) 빔을 핀홀과 원통렌즈(cylindrical lens)를 통과시켜 만들어졌다. 카메라 영상에서 얻어진 영상의 개수는 초당 100개로 설정하였으며, 얻어진 영상은 컴퓨터를 이용한 후처리 과정을 통하여 각 입자궤적의 길이가 평가되었다. 자료분석에 사용된 입자의 궤적선은 유동 수평축과 이루는 각도가 10° 이하인 경우로 제한하였으며, 서로 겹치거나 불규칙적인 패턴을 보이는 경우는 제외하였다. 다음 Fig. 3에는 입자속도 측정을 위한 속도측정계의 개략도가 제시되어 있다.

연구에 사용된 연마제는 실리콘카바이드 계열 (black-silicon-carbide F46, F400; EST Abrasive)로 입자밀도는 $3210\text{kg}/\text{m}^3$, 입자의 평균직경은 각각 $350\mu\text{m}$ 와 $35\mu\text{m}$ 인 두 가지이나, 본 연구에서는 직경 $350\mu\text{m}$ 인 F46 제품의 경우에 한하여 관찰이 진행되었다. 상용노즐과 수정노즐은 모두 노즐유동이 완전팽창 되도록 유동전압을 6.1기압으로 유지하였고, 이때 유동의 전온(total temperature)은 실험 중 상온(약 298K)에서 크게 변화하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 입자속도 측정결과의 검증

본 연구에서 응용된 입자속도 측정방법은 그 구성이 비교적 간단하여 측정오차 또한 적지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로

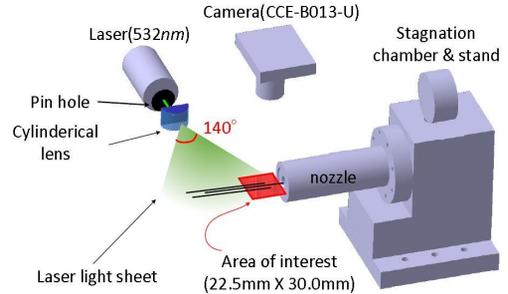


Fig. 3 Measurement system of particle velocity

속도측정계에 대한 신뢰도가 검증되었다. 즉, 본 연구에서 응용한 속도측정계로 시로코펜 블레이드의 원주방향 회전속도를 측정하고, 이를 타코메타(TM-5010, LINE SEIK)로 측정된 각속도에서 얻어진 속도와 서로 비교하였다. 10회에 걸쳐 본 연구의 속도측정계를 이용하여 측정된 블레이드 각속도의 평균값은 $423.0\text{rad}/\text{s}$ (편차 약 1.7%)로 나타나 타코메타에서 얻어진 결과인 $425.5\text{rad}/\text{s}$ 와 약 0.7%의 차이를 보이고 있음이 확인되었다.

3.2 두 가지 연마노즐의 비교실험

선택된 상용노즐(B5M4-F, Kennametal)과 수정노즐에서의 입자거동을 해석코드와 입자속도 측정을 통하여 서로 비교하였다. 해석코드 계산에 필요한 노즐 내벽의 마찰계수(f)는 와이어 가공을 기준으로 한 표면조도 $3.2\mu\text{m}$ 를 바탕으로 하고,^[12] 노즐입구와 노즐목, 그리고 노즐출구 세 위치에서 유동의 레이놀즈수와 상대조도를 평가하여 Haaland 방정식^[13]을 통하여 얻어졌다. 노즐 수축부의 마찰계수는 노즐입구와 노즐목에서 얻어진 마찰계수의 평균값을, 노즐 확대부의 마찰계수는 노즐목과 노즐출구에서 얻어진 마찰계수의 평균값을 사용하였다. 이와 같이 평가된 마찰계수의 노즐 내부에서의 변화는 0.0161에서 0.0167 사이 범위로 나타났다.

Laser light sheet을 이용한 속도측정은 노즐출구 바로 후방인 지점과 노즐출구에서 200mm 떨어진 두 곳에서 이루어졌으며, 다음 Fig. 5에 노즐출구를 왼쪽 모서리에 걸쳐 찍은 영상의 한 예가 제시되어 있다. 입자의 궤적은 상용노즐과 수정노즐 두 경우

에 대하여 각각 19개, 17개의 표본을 통하여 얻어졌다.

다음 Fig. 6에는 두 가지 노즐에서 얻어진 해석코드의 결과와 실험결과가 서로 비교되어 있다. 여기서 x 는 노즐입구에서 시작된 유동방향 축이며, L 은 노즐 총길이를 뜻한다. 노즐 내부를 흐르는 유동속도의 해석코드 계산 결과에서 개선(modified)노즐은 상용노즐의 경우보다 노즐출구에서의 유동속도가 약간 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 개선노즐의 초음속 구간이 크게 길어져, 초음속에서 급격히 커지는 노즐 벽면에서의 마찰효과에 의한 것으로 판단된다. 입자 가속의 경우, 상용노즐은 $x/L=0.47$ 부근부터 시작되는 반면, 개선노즐에서는 초음속 구간이 시작되는 $x/L=0.14$ 지점에서부터 일찍 시작되어 노즐출구에서의 입자속도가 더 빨라지는 것을 알 수 있다.

노즐출구에서 나타나는 입자속도의 해석코드 결과와 속도측정 결과가 다음 Table 1에 보다 자세히 비교되어 있다. 전체적으로 입자속도의 측정결과는 해석코드에서 예측되었던 값보다 약 16~20% 정도 작게 관찰되고 있다. 수정노즐의 경우 노즐출구에서의 입자속도는 기존의 상용노즐보다 약 20% 정도(실험 결과), 약 16%(해석코드 결과) 정도 증가한 것을 알 수 있다. 이 결과는 Settles 등^[3]이 주장한 약 35%에 가까운 입자속도 개선효과 보다는 적은 것으로 판명된다. 노즐출구에서 200mm 떨어진 후방 위치에서 관찰된 입자속도는 노즐출구에서의 크기에서 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 노즐출구를 빠져 나온 공기유동

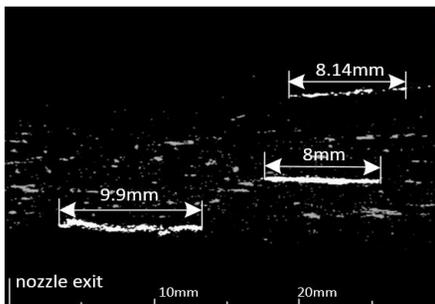


Fig. 5 An image sample of particle trajectories (stagnation pressure=6.1atm, stagnation temperature =298K, particle size=350 μ m, modified nozzle)

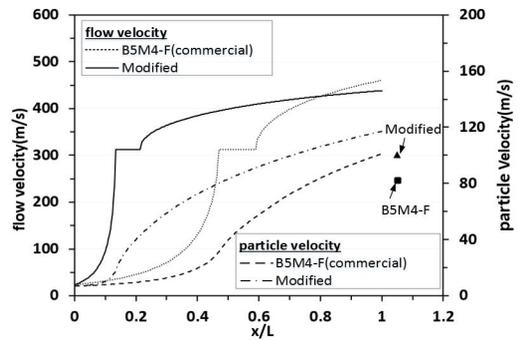


Fig. 6 Comparison of the air-particle velocities

은 후방으로 점차 감속하지만, 입자속도는 계속적인 가속을 통하여 노즐의 후방 일정 구간까지 유지되거나 약간 증가하는 것으로 판단된다. 또한 개선노즐의 경우에, 노즐출구에서 200mm 후방인 위치에서도 상용노즐에 비하여 약 12% 정도의 입자속도 증가가 나타나고 있음이 관찰되었다.

3.3 연마제의 구형도 영향

연마제의 형상과 구형도(sphericity), 그리고 크기는 본 연구에서 응용된 해석코드 계산과정에서 직접적인 영향을 미치는 주요 인자이며, 이에 따라 전자현미경(SEM)을 이용한 연마제의 형상을 직접 관찰하여 그 크기와 구형도를 관찰하여 보았다. 다음 Fig. 7에는 전자현미경에서 얻어진 입자 촬영영상의 한 예가 제시되어 있다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이 입자형태는 실제 가정된 구형에서 크게 벗어나 있으며, 입자의 평균 크기도 제조사가 제공한 정보(350 μ m)와 적지 않은 차이를 보이고 있다.

Table 1 Comparison of the particle velocity

Commercial Nozzle (B5M4-F, Kennametal)			
measurement of particle velocity at nozzle exit (m/s)	velocity calculation at nozzle exit by 1-D code (m/s)	difference (%)	measurement of particle velocity at x=200mm (m/s)
83.9 \pm 15.1	101.0	20.38	87.0 \pm 18.6
Modified Nozzle			
measurement of particle velocity at nozzle exit (m/s)	velocity calculation at nozzle exit by 1-D code (m/s)	difference (%)	measurement of particle velocity at x=200mm (m/s)
100.8 \pm 21.8	117.1	16.2	97.4 \pm 17.2

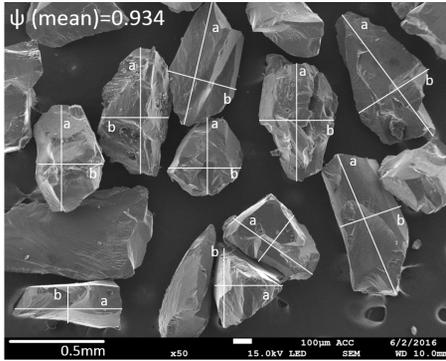


Fig. 7 SEM image of the abrasive particles

이에 본 연구에서는 비구형인 입자형태가 입자에 가해지는 항력과 입자속도 계산에 미치는 영향을 기존 해석코드 계산과정에 추가하였다. 과거 Wadell^[14]은 입자의 구형도(sphericity, ψ)를 식 (1)로 나타낸 바 있고, 여기서 a, b는 각각 입자의 장반경과 단반경의 크기를 의미한다. 또한 Ganser^[15]는 입자의 구형도에 따른 항력계수 관계를 다음 식 (2)~(4)로 제시한 바 있다. 전자현미경 영상자료에서 추출된 표본개수 49개의 입자형상을 이용하여 계산된 입자 구형도는 0.953으로 나타났다. 또한 항력계산에 사용된 입자의 대표직경은 다음 식 (5)로 주어진 체적등가직경(volumetric equivalent diameter, D_{eq})^[16] 정의를 참고하였는데, 본 연구의 경우 하나의 입자를 장반경과 단반경을 가진 두 개의 구로 가정하여 이 두 구의 등가직경을 구한 후, 이를 49개 입자에 대한 평균값으로 계산하였다. 평가과정에서 최종 얻어진 체적등가직경은 503 μm 로 평가되어 제조사가 제공한 정보보다 큰 것으로 나타났다.

$$\psi = \frac{\frac{1}{\pi^3} (6V_p)^{\frac{2}{3}}}{A_p} = \frac{2^3 \sqrt{ab^2}}{a + \frac{b^2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln\left(\frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b}\right)} \quad (1)$$

$$\frac{C_D}{K_2} = \frac{24}{Re K_1 K_2} [1 + 0.1118 (Re K_1 K_2)^{0.6567}] + \frac{0.4305}{1 + \frac{3305}{Re K_1 K_2}} \quad (2)$$

$$K_1 = \left[\frac{1}{3} + \left(\frac{2}{3} \right) \psi^{-0.5} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$K_2 = 10^{1.8148(-\log \psi)^{0.5743}} \quad (4)$$

Table 2 Comparison of the particle velocity

Commercial Nozzle (B5M4-F, Kennametal)		
particle velocity at nozzle exit (m/s)	recalculation after evaluation of sphericity and D_{eq} (m/s)	difference between recalculation and measurement (%)
83.9 ± 15.1	88.5	5.5
Modified Nozzle		
particle velocity at nozzle exit (m/s)	recalculation after evaluation of sphericity and D_{eq} (m/s)	difference between recalculation and measurement (%)
100.8 ± 21.8	103.3	2.5

$$D_{eq} = \left(\frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i} \right)^{1/3} \quad (5)$$

이와 같이 새롭게 평가된 입자의 크기와 구형도를 이용하여 해석코드에서의 항력계수가 재평가 되었고, 이후 최종 얻어진 코드계산의 결과가 다음 Table 2에 정리되어 있다. Table 2에 나타난 바와 같이 개선된 해석코드의 결과는 상용노즐의 경우 실험값과 약 6% 정도, 개선노즐의 경우 실험값과 약 3%의 차이를 보이고 있다. 따라서 약 16~20% 범위의 차이가 났던 이전 해석코드 결과에 비하여 실험값에 보다 가까워짐을 알 수 있다.

4. 결론

초음속 연마노즐의 내부형상의 변화를 통하여 노즐출구에서의 연마재 속도를 증가시키기 위한 연구가 진행되었다. 이를 위하여 노즐 내벽의 마찰효과와 연마재 구형도가 항력에 미치는 효과를 포함한 해석코드가 개발되어 사용되었다. 추가로 연마노즐 출구에서 나타나는 연마재의 속도를 측정하기 위한 간단한 실험장치가 응용되었다. 특정 상용노즐과 동일한 출구마하수와 노즐 총길이를 갖는 수정노즐이 설계 제작되어 해석과 실험에서 얻어진 연마재 속도크기가 서로 비교 검토되었고, 그 결과 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

(1) 입자속도의 측정 결과, 개선된 노즐형상을 통하여 노즐 출구에서의 입자속도는 기존 상용노즐에

비하여 최대 약 20% 증가하였다. 노즐출구 후방 200mm 인 지점에서의 입자속도는 개선노즐의 경우 기존 상용노즐에 비하여 약 12% 증가하였다.

(2) 사용된 입자의 실제 구형도와 등가직경을 평가하여 다시 계산된 해석코드 결과는 속도 측정결과와 약 3~6% 범위의 차이를 보여, 그 오차가 크게 줄어들었다.

후 기

“이 논문의 일부 내용은 2015년도 한국연구재단 기본연구지원사업 (과제번호: 2014R1A1A2058320) 연구비 지원에 의하여 연구되었음”

REFERENCES

1. Fokke, M., Abrasive Blasting of Metal Surfaces, Delft University Press, 1989.
2. Settles, G. S. and Garg, S., “A Scientific View of the Productivity of Abrasive Blasting Nozzles,” Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 35-41, 1996.
3. Settles, G. S. and Geppert, S. T., “Redesigning Blasting Nozzles to Improve Productivity,” J. of Protective Coatings and Linings, Vol. 13, pp. 64-72, 1996.
4. Settles, G. S., “Abrasive Blast Cleaning Nozzle,” US Patent-5-975-996, 1999.
5. Li, W. Y. and Li, C. J., “Optimal design of a Novel Cold Spray Gun Nozzle at a Limited Space,” Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 14, No. 3, pp. 391-396, 2005.
6. Bae, H. J., Baek, J. J., Lee, C. S., Shin, C. S., Lee, B. H., Shin, S. R., Baek, K. K. and Kim, K. S., “Improving Blasting Productivity by Optimizing Operation Parameters,” Journal of Protective Coating and Linings, Vol. 24, No. 11, 2007.
7. Lee, M. W., Yoon, S. G., and Kim, H. Y., “Numerical study on characteristics of particle velocity with various particle size in the supersonic flow,” Proceedings of KSME 2009 Fall Annual Meeting, 2009.
8. Kwon, E. H., Cho, S. H., Han, J. W., Lee, C. H., and Kim, H. J., “Particle Behavior in Supersonic Flow during the Cold Spray Process,” Metals and Materials International, Vol. 11, No. 5, pp. 377-381, 2005.
9. Jodoin, B., “Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation,” Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 496-507, 2002.
10. Kwak, J. Y., Jeon, I. J., Park, S. E., Lee, Y., “Improvement of Performance of Supersonic Abrasive Blasting Nozzle,” J. of KSMPE, Vol. 15, No. 2, pp. 9-15, 2016.
11. John, J. E., Keith, T. G., Gas Dynamics, p. 79, Prentice Hall, 3rd edition, 2006
12. Kalpakjian, S., Schmid, S. R., Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed., Pearson Education.
13. Cengel, Y. A., Cimbala, J. M., Fluid Mechanics, 3rd ed., McGraw Hill, p. 368, 2014.
14. Wadell, H., “Volume, shape and roundness of quartz particles,” Journal of Geology, pp. 250-280, 1935.
15. Gansner, G. H., “A rational approach to drag prediction of spherical and nonspherical particles,” Powder Technology, Vol. 77, No. 2, pp. 143-152.
16. Jo, G. S., Sin, J. S., Kim, J. H., “Measurement of Particle Size and Particle Size Distribution.” Polymer Science and Technology, Vol. 15. No. 2, pp. 198-208. 2004.