

압축성 유동해석에 기초한 곡면 세정을 위한 브라스팅

광폭 노즐의 설계 및 성능시험

김태형[†] · 곽준구 · 손명환

청주대학교 항공기계공학과

(2019년 2월 1일 접수, 2019년 3월 4일 수정, 2019년 3월 11일 채택)

Design and Performance Test of Wide Blasting Nozzle for Curved Surface Cleaning based on Compressible Flow Analysis

Taehyung Kim[†] · Jun Gu Kwak · Myong Hwan Sohn

Department of Aeronautical and Mechanical Engineering, Cheongju University

(Received 1 February 2019, Revised 4 March 2019, Accepted 11 March 2019)

요 약

본 연구에서는 산업용 발전설비 부품의 곡면을 표면처리 하기 위한 브라스팅 노즐을 설계한 후 압축성 유동해석을 통해 분사 성능을 살펴보았다. 이때 곡면 노즐의 출구는 부품의 표면을 따라 곡면으로 설계되었다. 3차원 프린팅으로 노즐을 제작한 후 실린더형 시편의 표면에 연마재를 분사하여 세정 성능시험을 수행하였다. 해석 후 얻은 유효 세정 면적과 실험 후 얻은 유효 세정 면적의 크기와 형상이 유사하였으며 이로부터 곡면형 노즐 설계의 타당성 및 실효성을 확인하였다.

주요어 : 브라스팅, 광폭 곡면 노즐, 표면세정, 3차원 프린팅, 압축성 유동해석

Abstract - In this study, the blasting nozzle for surface treatment of the curved surface of parts in power plant industry was designed and the cleaning performance was examined through the compressible flow analysis. At this time, the outlet of the curved nozzle was designed as a curved surface along the surface of the part. After the nozzle was made by 3-D printing, the abrasive was sprayed on the surface of the cylindrical specimen and the cleaning performance test was performed. The effective cleaning area obtained after the analysis was similar to the size and shape of the effective cleaning area obtained after the experiment. From this, the validity and effectiveness of the curved nozzle design was confirmed.

Key words : Blasting, Curved Wide Bore Nozzle, Surface Cleaning, 3-D Printing, Compressible Flow Analysis

1. 서 론

브라스팅(Blasting) 공정은 발전설비, 항공산업, 기계 및 조선해양 산업분야 등 전 분야에서 부품의 표면처리를 위해 많이 적용된다⁽¹⁻⁴⁾. 이와 같은 브라스팅 공정은 대부분 분사 노즐을 사용하는데 이 노즐

을 통해 표면 세척용 마이크로 단위의 입자들이 입력된 공기압력에 의해 내부 유로를 지나면서 속도가 증가되고 출구로 배출된다. 이렇게 배출된 거친 입자들이 부품 표면에 충돌되면서 표면에 묻은 오염된 오일이나 페인트, 녹 등과 부딪혀 이들을 제거한다. 최근에는 치아 임플란트의 나선 부분의 표면적을 넓히면서 요철을 주기 위해 사용되기도 하는 등 그 응용분야가 매우 넓다. 이처럼 주입되는 공기압력에 의존되는 세척용 입자들의 거동에 따라 브

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-43-229-8449 E-mail : kthmax@cju.ac.kr

라스팅 공정의 효율은 달라진다. 따라서 공정효율 개선을 위한 브라스팅 노즐의 설계 변수에 관한 선행 연구결과가 보고된 바 있다⁽⁵⁾. 또한 입력되는 공기와 세척용 연마재가 섞인 합성 유체가 노즐 출구를 떠나면서 발생하는 충격파에 의한 영향을 고려한 연구도 있었다⁽⁶⁾. 국내에서도 브라스팅 노즐 내부 유로의 형상이나 인가되는 공기 압력, 연마재의 입도 및 재질, 그리고 분사 노출시간 등 여러 변수들의 영향을 고려하여 성능을 효과적으로 개선시킬 수 있는 방법도 제시되었다⁽⁷⁾. 이와 같은 노력들로 브라스팅 공정을 위한 노즐의 성능이 꾸준히 향상되어 오고 있다. 현재 산업용 발전설비 및 부품들은 그 규모가 상대적으로 크고 세정 면적이 넓으며 무엇보다 다양한 곡면을 갖는다. 가스터빈 발전용 터빈 블레이드 및 휠, 로터 등은 운전과 정지를 반복하므로 주기적인 부품 표면의 세정이 필수적이다. 따라서 이와 같은 곡면을 갖는 부품의 표면을 효율적으로 세정하기 위해서는 현재 많이 사용되고 있는 단순 원형의 소직경을 갖는 벤츄리 노즐보다는 폭이 넓은 와이드 보어 노즐의 사용이 효율적일 수 있다. 이에 Kwak 등^(8,9)은 폭이 넓은 브라스팅 노즐에 대한 유동해석을 수행한 바 있다. 그러나 노즐 출구가 직선형이며 비압축성 유동해석이 수행되었고 무엇보다 실험적 검증이 수반되지 않아 실효성이 떨어진다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 광범위한 면적을 효율적으로 세정하기 위한 브라스팅용 와이드 보어 노즐을 3차원 캐드로 설계하고 압축성 유체를 고려한 유동해석을 수행하여 유효한 세정 면적을 구해본다. 이때 노즐 형상은 출구측이 직선형인 와이드 보어 노즐과 제품의 표면을 따라 곡면으로 설계한 곡면형 노즐을 반영하였다. 그리고 3차원 프린팅 공정으로 노즐들을 제작하여 브라스팅 성능시험을 수행한다. 해석적 유효 세정면적과 실

제 브라스팅 유효 면적을 비교하여 곡면형 노즐의 실효성을 살펴본다.

2. 직선형 와이드 보어 노즐의 유동해석 및 성능실험

2-1. 직선형 와이드 보어 노즐의 유동해석 모델 수립

본 연구에서는 커브형 와이드 보어 노즐을 설계하기 전에 직선형 와이드 보어 노즐에 대한 압축성 유동해석을 수행하였다. Fig. 1은 직선형 와이드 보어 브라스팅 노즐 형상 및 제원을 보여준다. 직선형 와이드 보어 노즐의 입구측 직경(D_1)은 25mm이고 출구는 장폭이 70mm이고 단폭이 1.5mm인 직사각형으로 설계되어 있다. 그리고 이 노즐의 전체 길이는 150mm이다. 본 연구에서는 입력측에 인가되는 공기 압력을 4bar(=0.4MPa)로 선정하였으며 노즐 출구로부터 표면처리를 위한 유효 분사거리 l 을 65mm로 정하였다. Fig. 2는 직선형 와이드 보어를 갖는 브라스팅 노즐의 유동해석을 위한 유한요소 모델을 보여준다. 유동해석을 위해 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 Ansys workbench를 사용하였고^(10,11) 해석시 유체는 공기밀도가 상시 바뀌는 압축성 공기로 가정하였다. 공기밀도는 1.225kg/m^3 로 설정하였고 유동해석에 사용된 난류모델은 (k- ϵ) 모델이며 해석시간의 단축을 위해 1/4 대칭 조건을 반영하였다. 본 압축성 유동해석에 사용된 유한요소는 CUTCELL 요소이며, 요소의 크기는 0.7mm로 하였다. 그리고 총 사용된 요소의 개수는 1,537,458개이다.

2-2. 직선형 와이드 보어 노즐의 유동해석 결과

Fig. 3의 (a)는 직선형 와이드 보어 노즐의 유동해석 후 벽면에 유체가 부딪힐 때의 압력분포를 보여

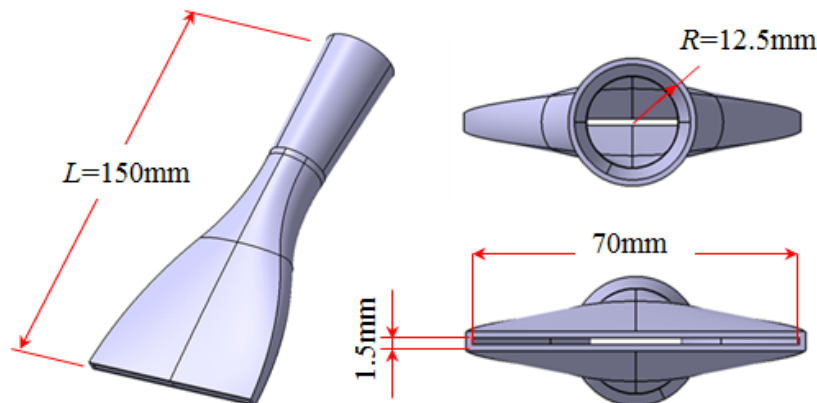


Fig. 1 Specification of standard type blasting nozzle

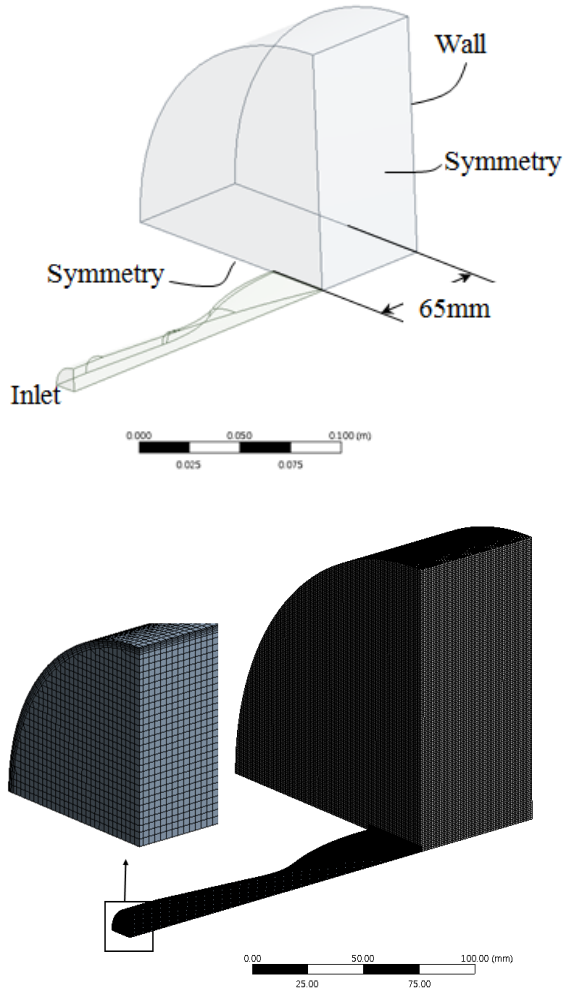
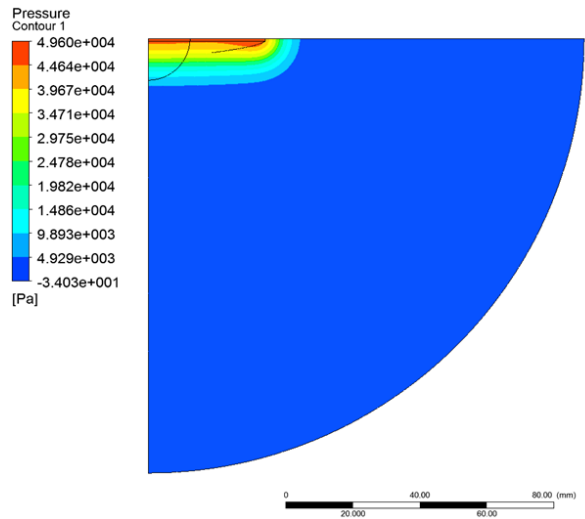


Fig. 2 Flow analysis model of the standard blasting nozzle

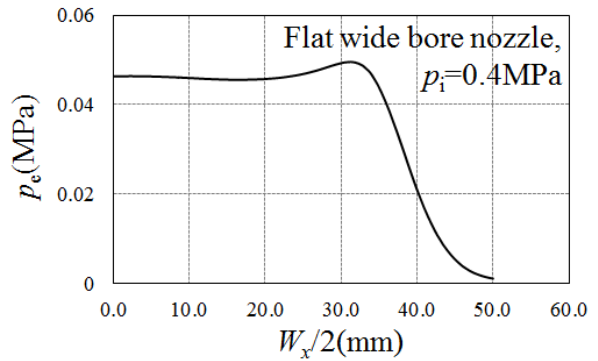
준다. (b)는 중심으로부터 x 방향으로의 유효 압력 분포를, (c)는 y 방향으로의 유효 압력분포를 보여 준다. (b)에서 노즐의 축 중심에서 유효 압력 p_e 가 약 0.49Pa이고 x 방향으로 32mm 위치까지는 압력이 감소되지 않으나 이후부터 급격하게 감소한다. 그리고 약 50mm 위치에서 압력이 0이 된다. 또한 (c)에서 노즐의 축 중심으로부터 y 방향으로 약 20mm가 되면 압력이 0이 된다. 따라서 유동해석을 통한 유효 세정 면적은 장축 100mm, 단축 40mm인 긴 타원의 면적이 된다.

2-3. 직선형 와이드 보어 노즐의 분사 성능시험

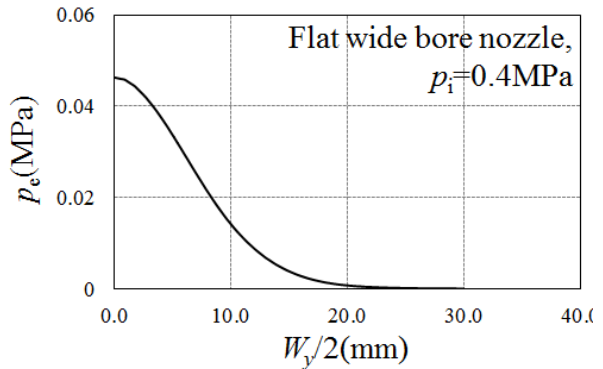
Fig. 4는 압축성 유동해석에 기초한 직선형 와이드 보어 노즐의 분사 성능시험을 위해 3차원 프린팅으로 제조한 노즐 시제품을 보여준다. 그리고 Fig. 5는 직선형 와이드 보어 노즐에서 분사된 연마 재에 의해 마모된 형상과 크기를 보여준다. 브라스



(a) Pressure distribution contour



(b) x-direction pressure



(c) y-direction pressure

Fig. 3 Pressure distribution after incompressible flow analysis of standard blasting nozzle

팅 성능시험 조건은 유동해석 모델에 반영한 조건과 동일하게 설정하였다. 입력 압력을 0.4MPa로 하였으며, 노즐 출구로부터 시편 표면까지의 거리를 65mm로 하였다. 실험 후 직선형 브라스팅 노즐의

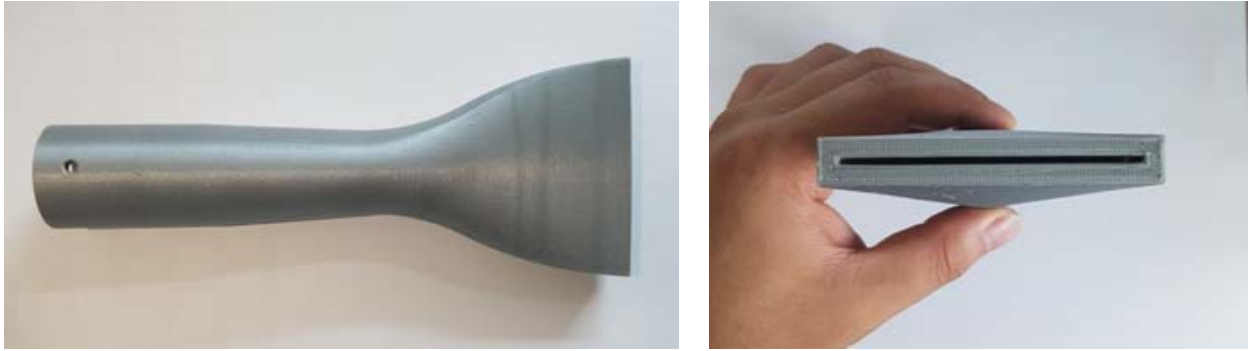


Fig. 4 Effective cleaning area after blasting test of standard nozzle

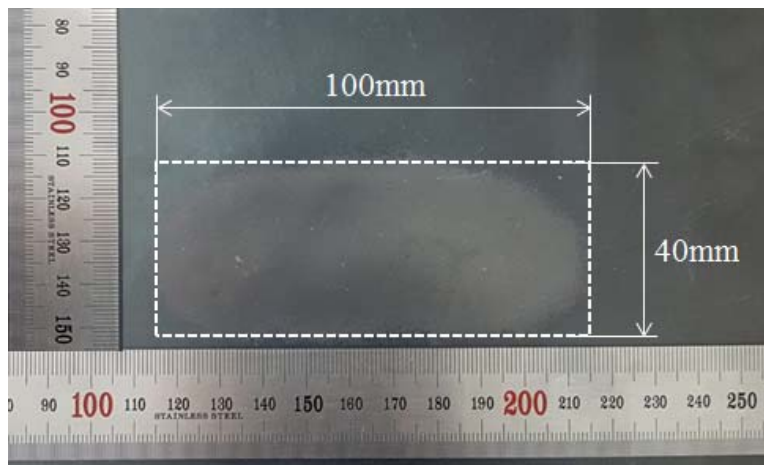


Fig. 5 Effective cleaning area after blasting test of standard nozzle

유효 면적은 장폭 100mm, 단폭 40mm로 측정되었다. 이 유효 면적은 해석 후 얻은 유효 면적과 그 크기가 같고 형상이 매우 유사함을 알 수 있다. 이로부터 압축성 유동해석 및 노즐 분사 성능시험을 통해 와이드 보어 노즐의 해석적 조건 설정의 유효성을 확인하였다.

3. 커브형 와이드 보어 노즐의 유동해석 및 성능실험

3-1. 커브형 와이드 보어 노즐의 유동해석 모델 수립

전 절에서 압축성 유동해석을 통해 얻은 직선형 와이드 보어 노즐의 유효 면적에 대한 해석적 접근의 유효성을 확인한 후 본 절에서는 출구측 형상이 커브형을 갖는 와이드 보어 노즐을 설계하였다. Fig. 6는 커브형 와이드 보어 노즐의 형상과 제원을 보여준다. Fig. 6으로부터 입구 직경은 25mm로서 직선형 와이드 보어 노즐과 같다. 출구측 단면은 직사각형 모양을 가지며 홈의 장폭은 70mm, 단폭은

1.5mm이다. 그리고 노즐 라이너의 총 길이는 150mm로 동일하다. 그리고 이 노즐에 대해 Fig. 7과 같이 유동해석 모델을 수립하였다. 해석모델은 유체가 흐르는 노즐 라이너의 내부를 3차원 격자로 구성하여 수립하였으며, 앞서 직선형 노즐의 유동해석 모델과 같이 비압축성 공기를 유체로 가정하였다. 공기밀도는 1.225kg/m^3 , 입력 압력 $p_i=0.4\text{MPa}$ 로 설정하였고 난류 모델 또한 (k- ϵ) 모델을 적용하였으며 해석시간의 단축을 위해 1/4 대칭 조건을 반영하였다. 본 해석에 사용된 유한요소는 육면체요소(HEX DOMINANT 옵션)이며, 요소의 크기는 0.7mm로 하였다. 그리고 총 사용된 요소의 개수는 1,171,133개이다. 그리고 노즐 출구로부터 65mm 떨어진 위치에 실린더형 시편 모델을 수립하였다.

3-2. 커브형 와이드 보어 노즐의 유동해석 결과

Fig. 8의 (a)는 커브형 와이드 보어 노즐의 압축성 유동해석 후 공기 입자의 속도흐름을 보여준다. 압축성 유체인 공기가 출구로 나와 65mm 떨어진 실린더형 원통 표면에 부딪히기까지 가로 폭이 넓고

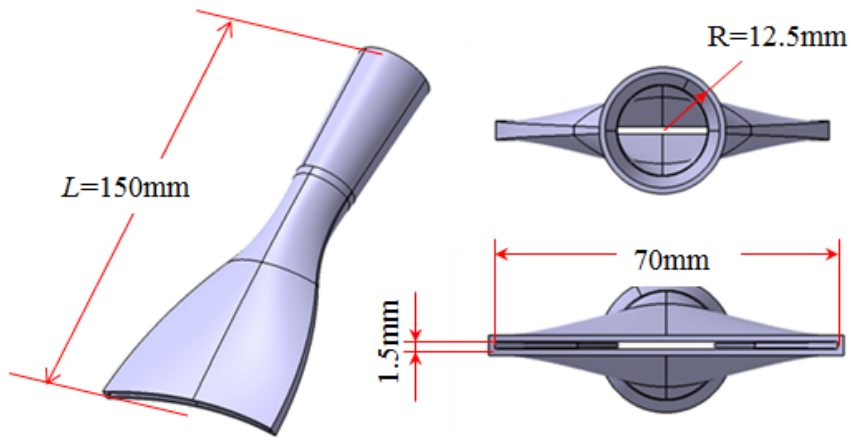


Fig. 6 Curved nozzle with wide bores

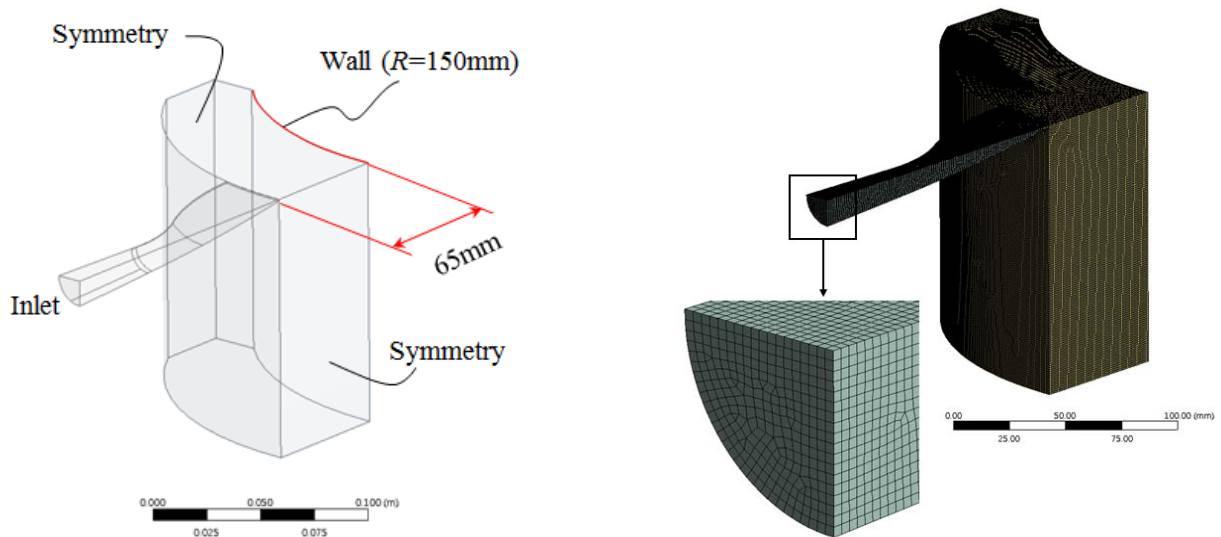


Fig. 7 Flow analysis models of wide bore nozzles

세로 폭이 좁은 형태로 진행하다 곡면에 부딪히면서 사방으로 비산된다. 그리고 Fig. 8의 (b)는 공기 입자가 실린더형 물체 표면에 부딪힐 때 생성된 등고선 형태의 압력분포를 보여준다. 노즐의 중심으로부터 x 방향으로 길고 균일한 압력분포를 가지며, y 방향으로는 압력이 현저히 감소됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 9는 Fig. 8의 (b)에서 얻은 압력분포 등고선을 x 축 방향과 y 축 방향의 압력분포로 각각 도시한 그래프를 보여준다. 해석 후 x 방향으로 분사된 유효길이는 약 84mm이고 y축 방향으로 분사된 유효 길이는 약 35mm로서 직선형 와이드 보어 노즐의 해석결과와 다소 차이를 보인다. 이는 직선형의 경우 노즐 출구의 좌우 끝에서 분사된 공기입자들이 시편 표면까지 직진으로 진행되어 부딪히므로 장폭과 단폭의 크기를 그대로 유지하나 커브형의

경우 실린더형 원통 시편 표면까지의 거리가 중앙 부위와 좌우 끝이 달라 중앙부위에서 공기가 집중 충돌되고 좌우 끝에서는 곡면에 공기가 빗겨가기 때문에 세정 면적에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 이로부터 압축성 유동해석을 통한 유효 브라스팅 면적은 84mm× 35mm로 선정하였다.

3-3. 커브형 와이드 보어 노즐의 분사 성능시험

Fig. 10은 압축성 유동해석에 기초한 커브형 와이드 보어 노즐의 분사 성능시험을 위한 시제품을 보여준다. 이 시제품은 3차원 프린팅으로 제조되었다. 또한 Fig. 11은 커브형 와이드 보어 노즐을 이용하여 브라스팅 분사 시험을 수행한 후 분사된 연마재에 의해 실린더형 원통 시편의 표면이 마모된 형상과 크기를 보여준다. 이때 브라스팅 성능시험을 위

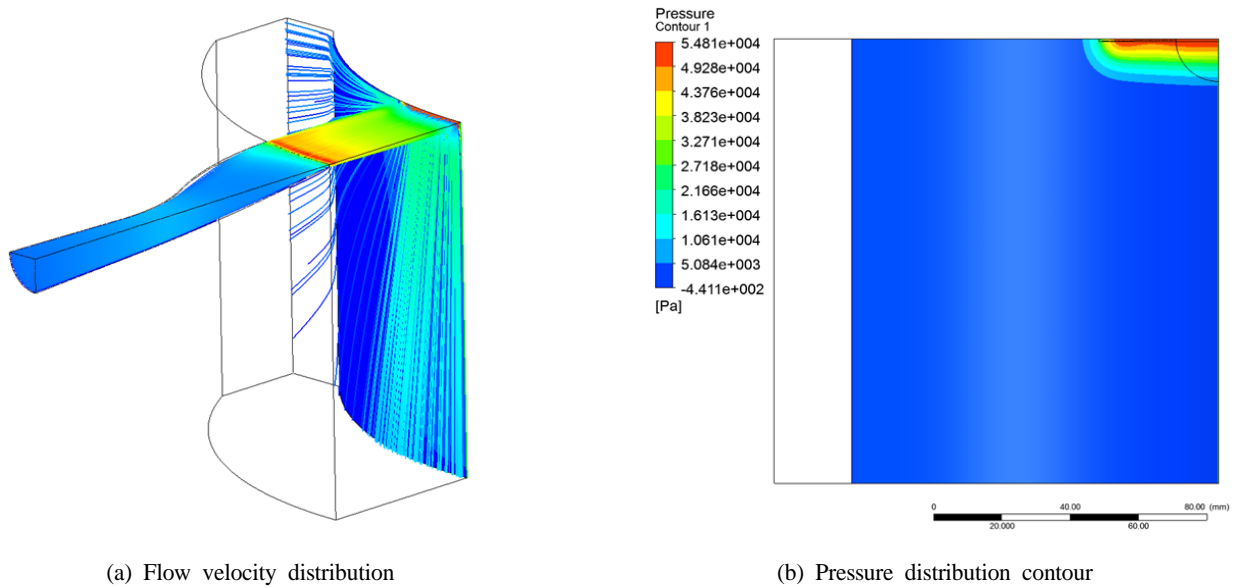


Fig. 8 Flow velocity and pressure distribution after compressible flow analysis

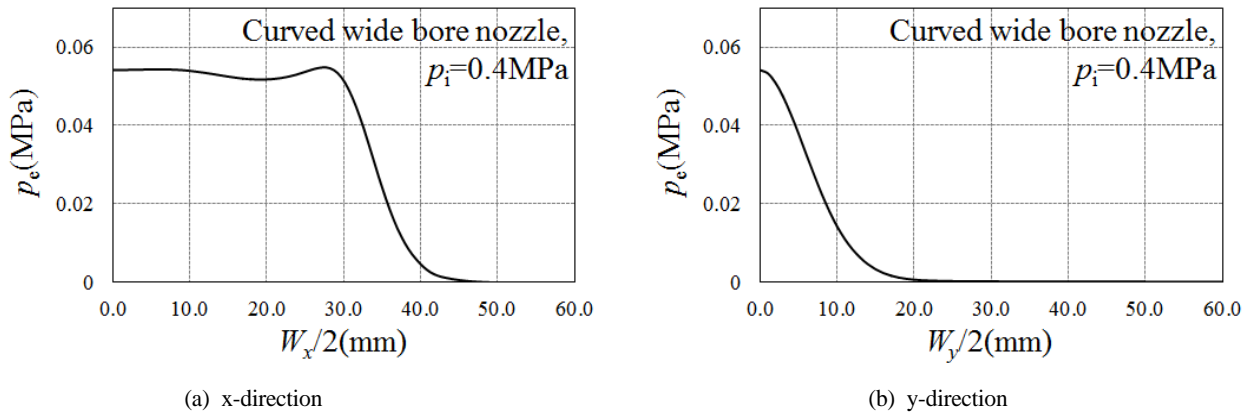


Fig. 9 Pressure distribution after compressible flow analysis of the curved wide bore nozzle

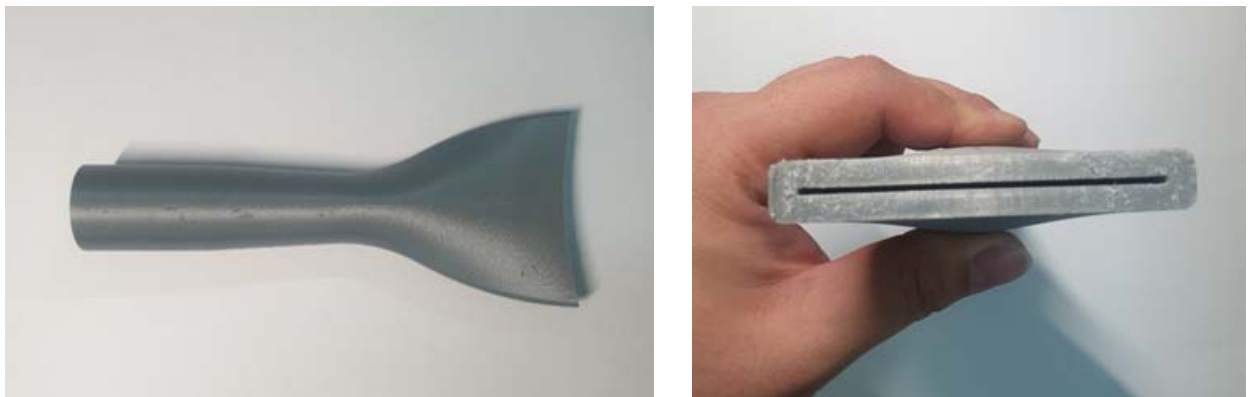


Fig. 10 Cleaning performance test of the wide bore nozzle A

한 입력 조건들은 선행 유동해석 모델에 반영한 조건들과 같게 하였다. 입력 압력은 0.4MPa, 노즐 출

구에서 실린더형 원통 시편 표면까지의 거리는 65mm로 하였다. 브라스팅 분사 성능시험 후 커브

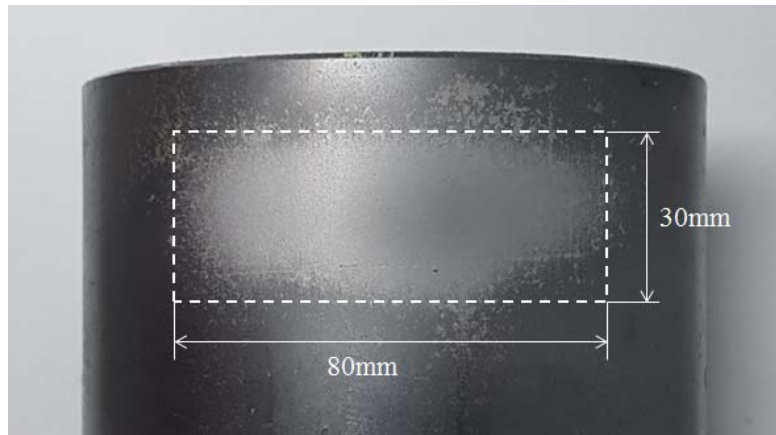


Fig. 11 Cleaning performance test of the wide bore nozzle B

형 와이드 보어 노즐의 유효 면적은 장폭 80mm, 단 폭 30mm로 측정되었으며 역시 직선형 와이드 보어 노즐보다 유효 면적이 작게 측정되었다. 그러나 본 연구에서 압축성 유동해석을 통해 얻은 유효 브라스팅 면적이 실험적 유효 브라스팅 면적에 근접함을 알 수 있다. 이로부터 압축성 유동해석을 통한 커브형 와이드 보어 노즐의 설계가 타당함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 산업용 발전설비 부품의 곡면을 연마할 수 있는 커브형 와이드 보어 노즐을 설계하였고 압축성 유동해석을 수행하였다. 3차원 프린팅으로 노즐 시제품을 제작하여 브라스팅 실험을 수행하였으며 결론은 다음과 같다.

1. 직선형 와이드 보어 노즐을 설계한 후 압축성 유동해석을 수행하여 100mm×40mm의 유효 세정 면적을 얻었다. 이 노즐을 사용하여 브라스팅 성능시험을 수행하였고 100mm×40mm의 유효 세정 면적을 얻어 해석과 실험이 동일하였다.
2. 커브형 와이드 보어 노즐을 설계한 후 유동해석을 통해 실린더형 원통 시편 표면에서 84mm×38mm의 면적에서 압력분포가 유효하였다. 또한 이 노즐을 3D 프린팅으로 제조한 후 브라스팅 성능시험을 수행하였으며 80mm×30mm의 유효 세정 면적을 얻었다.
3. 커브형 와이드 보어 노즐이 직선형 와이드 보어 노즐보다 브라스팅 면적이 작았으나 커브형 와이드 보어 노즐의 경우 해석적 유효 세정 면적과 실험적 유효 세정 면적의 크기와 형상이 유사하였으며 본 연구의 압축성 유동해석을 통한 커브형 와이드 보어 노즐의 설계가 타당함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 2016년도 산업통상자원부 산업기술혁신사업 청정화력기술개발사업(No. 20161120200210)의 연구비 지원으로 수행되었음.

References

1. Barun, H., Tina, G., Rasid, A., Santau, D., Saha, P., 2017, Abrasive jet system and its various applications in abrasive jet machining, erosion testing, shot-peening, and fast cleaning, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 13061-13068.
2. Barun, H., Deb, K. A., Debarpan, G., 2018, Present status and some critical issues of abrasive jet materials processing: a review, *Procedia Manufacturing*, Vol. 20, pp. 523-529.
3. Jianxin, D., 2005, Erosion wear of boron carbide ceramic nozzles by abrasive air-jets, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 408, pp. 227-233.
4. Jianxin, D., Yihua, F., Ding, Z., Shi, P., 2003, Wear behavior of ceramic nozzles in sand blasting treatments, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 23, pp. 323-329.
5. Settles, G. S., Garg, S., 1996, A scientific view of the productivity of abrasive blasting nozzles, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 35-41.
6. Jodoin, B., 2002, Cold spray nozzle mach number limitation, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 496-507.
7. Bae, H. J., Baek, J. J., Lee, C. S., Shin, C. S.,

- Lee, B. H., Shin, S. R., Baek, K. K., Kim, K. S., 2007, Improving blasting productivity by optimizing operation parameters, *Journal of Protective Coating and Linings*, Vol. 24, pp. 11.
8. Kwak, J. G., Kim, H. S., Kim, S. H., Kim, T. H., Shon, M. H., 2018, Design of blasting nozzle with wide bore used in energy industrial field based on computational fluid dynamics, *Spring Symposium of the Korean Society for Energy*, pp. 276.
9. Kwak, J. G., Kim, T. H., Lee, S. K., Lee, S. C., 2018, Wide Bore Nozzle Design for Wide Area Blasting Treatment based on Computational Fluid Analysis, *Autumn Symposium of the Korean Society for Energy*, pp. 201.
10. Lihong, G., Huadong, L., Xinli, W., 2019, CFD analysis of the flashing flow characteristics of subcritical refrigerant R134a through converging-diverging nozzles, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 137, pp. 438-445.
11. ANSYS, 2018, *Fluent Ver. 18.2 User manual*.