

비압축성 유동해석에 기초한 대면적 표면처리용 브라스팅 노즐 설계 및 실험적 검증

김태형[†] · 곽준구 · 이세창* · 이상규** · 이승호***

청주대학교 항공기계공학과, *지엠테크 대표, **3D컨트롤즈(주) 연구소, ***경기과학기술대 자동차과
(2019년 1월 25일 접수, 2019년 2월 15일 수정, 2019년 2월 22일 채택)

Design and Experimental Verification of Blasting Nozzle for Wide Area Surface Treatment based on Incompressible Flow Analysis

Taehyung Kim[†] · Jun Gu Kwak · Se Chang Lee* · Sang Ku Lee** · Seung Ho Lee***

Department of Aeronautical and Mechanical Engineering, Cheongju University

*Management Department, GM Tech

**Research Institute, 3D Controls Co. Ltd., Department of Chemical Engineering, Kyunghee University

***Department of Automotive Engineering, Gyeonggi College of Science and Technology

(Received 25 January 2019, Revised 15 February 2019, Accepted 22 February 2019)

요 약

본 연구에서는 발전소에서 사용되는 부품의 넓은 표면을 세정하기 위한 브라스팅 노즐을 비압축성 유동해석에 기초하여 설계하였다. 설계된 노즐의 출구측 단면은 광폭의 직선 모양이다. 설계 후 3차원 프린팅으로 노즐 시제품을 제작하였고 이를 브라스팅 머신에 장착 후 세정 성능실험을 수행하였다. 해석 후 얻은 광폭 크기와 실험 후 시편 표면에서 얻은 세정된 광폭 크기가 거의 같았다. 이로부터 대면적 표면처리를 위한 브라스팅 노즐의 설계가 유효함을 확인하였다.

주요어 : 브라스팅, 광폭 노즐, 표면처리, 3차원 프린팅, 비압축성 유동해석

Abstract - In this study, a blasting nozzle was designed based on incompressible flow analysis to clean wide surface of parts used in power plant. The outlet side section of the designed nozzle has a wide bore with a linear shape. After the design, the nozzle prototype was made by three dimensional printing, and the cleaning performance test was performed after mounting it on the blasting machine. The wide bore size obtained after the analysis was almost the same as the wide bore size obtained from the surface of the plate specimen after the experiment. Ultimately, it was confirmed that the design of blasting nozzle for wide surface treatment is effective.

Key words : Blasting, Wide Bore Nozzle, Surface Treatment, 3-D Printing, Incompressible Flow Analysis

1. 서 론

통상적으로 브라스팅 노즐은 국내외 화력발전소 터빈의 핵심부품인 블레이드와 관련 설비 부품, 그

리고 각종 지그류의 표면 세정용으로 많이 사용된다⁽¹⁻⁴⁾. 현재 국내외로 무수히 많은 화력발전소가 가동되고 있으며, 신규 발전소가 추가적으로 건설되는 등 전기생산을 위한 발전소의 가동은 꾸준히 지속되고 있다. 따라서 발전소에서 사용되는 기계부품이나 기기들은 주기적으로 표면을 연마하거나 세정 등의 후처리가 요구되고 있으며 통상적으로 브

[†]To whom corresponding should be addressed.

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

라스팅 세정 기술이 적용된다. 이들 발전소에서 사용되는 기계부품들은 대부분 대형 구조로 되어 있어 국소면적이 아닌 광범위한 면적들을 갖는다. 따라서 현재 많이 사용되고 있는 벤추리 타입의 단순 원형 단면 출구를 갖는 산업용 브라스팅 노즐로는 균질한 세정을 보장하기 어렵다. 특히 표면연마 후 재조립되는 부품들의 경우 기존 상용 노즐의 출구 단면 폭이 좁아 수차례 겹쳐 세정하므로 부품 표면에 미세한 치수변화를 일으킨다⁽⁵⁾. 이는 조립 후 설비의 진동 발생에 적지 않은 영향을 주며 반복된 공정으로 인해 부품의 사용수명을 감소시키는 원인이 되기도 한다. 또한 상용 노즐의 대부분 출구 단면이 소직경을 갖는 원형이어서 넓은 면적을 세정할 경우 많은 시간이 소요되어 발전설비 정비시간을 지연시키는 현상을 발생시킬 수 있다⁽⁶⁾. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 대면적 표면 세정이 가능한 광폭의 출구 단면을 갖는 블라스팅 노즐을 설계한다⁽⁷⁾. 이때 비압축성 유체를 사용하여 유동해석을 수

행하고 분사 후 압력분포를 얻어 광폭 크기를 선정한다. 이후 3차원 프린팅 기술을 이용하여 노즐의 시제품을 제작하고 브라스팅 장비에 장착하여 실험을 수행한다. 실험 후 시편 표면에 세정된 광폭 크기를 측정하여 해석기반의 설계 노즐에 대한 유효성을 확인해 본다.

2. 표준형 브라스팅 노즐의 유동해석 및 성능실험

2-1. 표준형 브라스팅 노즐의 유동해석 모델 수립

본 연구에서는 와이드 보어 노즐을 설계하기에 앞서 먼저 표준형 노즐(SN156-4AP)에 대한 유동해석을 진행하였다. 먼저 표준형 노즐에 대한 역설계를 수행하였고 Fig. 1과 같이 3차원 해석모델 수립을 위한 2차원 설계도면을 제작하였다. 표준형 브라스팅 노즐 라이너는 내부 유로가 벤추리형이며 입구측 직경 $D_i=25\text{mm}$ 이고 출구측 직경 $D_o=10.8\text{mm}$ 이다. 그리고 내부 최소직경은 $D_m=6.4\text{mm}$ 이다. 브라

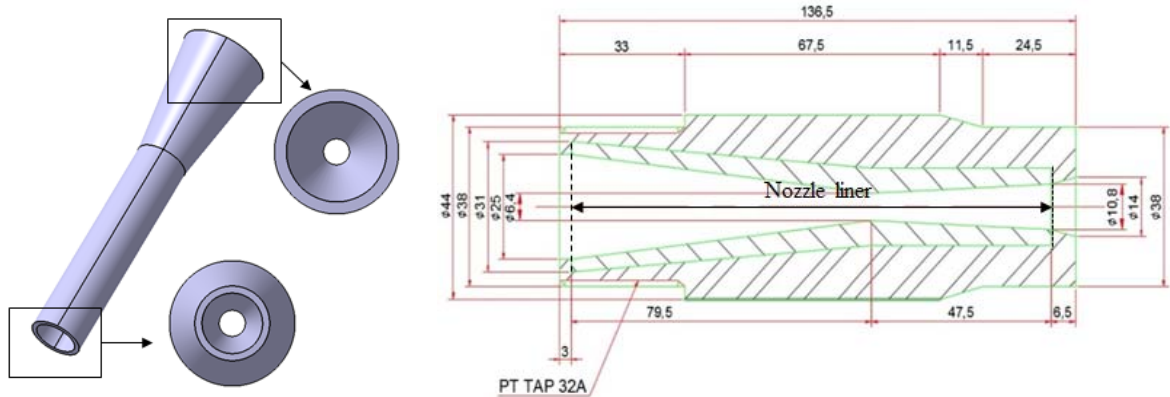


Fig. 1 Specification of standard type blasting nozzle

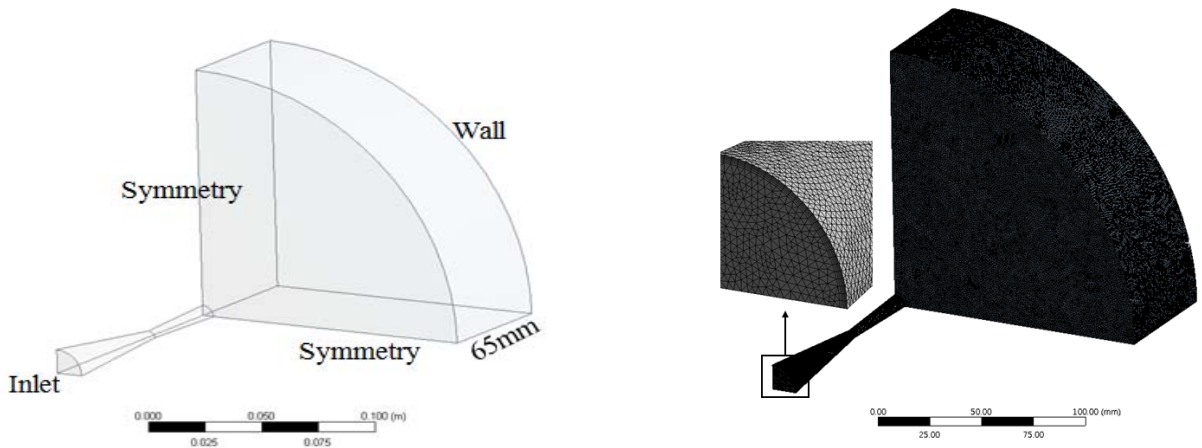
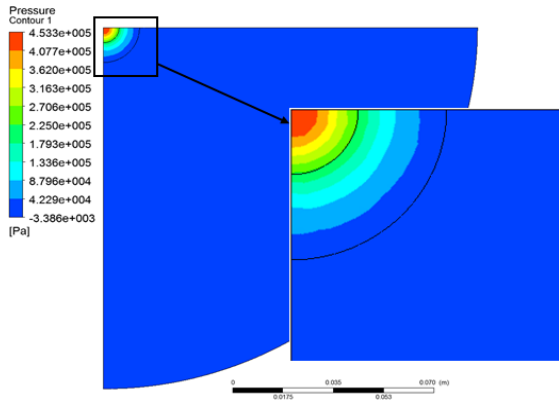
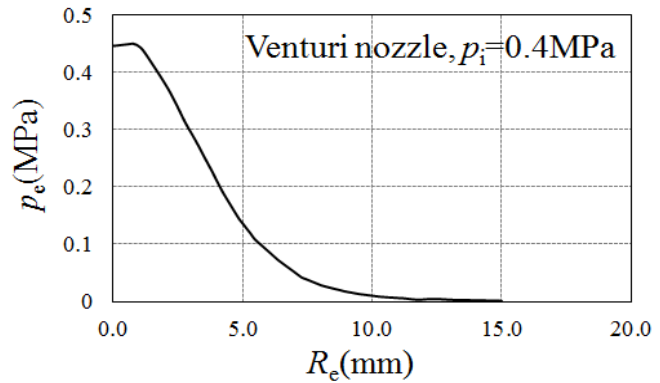


Fig. 2 Flow analysis model of the standard blasting nozzle



(a) Pressure distribution contour



(b) Effective cleaning radius

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

스팅 장비의 공기압 조절에 따라 다르긴 하나 보통 입구측 공기 압력(p_i)를 3bar(=0.3MPa)에서 5bar(=0.5MPa)로 설정하여 세정작업을 진행한다^(4,6,8,9). 따라서 본 연구에서는 입력압력을 이들의 중간 값인 4bar(=0.4MPa)로 선정하였다. 또한 브라스팅 장비를 이용하여 작업자들이 진행하는 유효 분사거리 l 은 보통 50-150mm이다. 본 연구에서는 65mm를 유효 분사거리로 선정하여 노즐의 설계 및 성능시험에 적용하였다. Fig. 2는 표준형 브라스팅 노즐의 유동해석을 위한 유한요소 모델을 보여준다. 본 연구에서는 상용 유한요소해석 소프트웨어인 Ansys workbench를 사용하였다^(10,11). 해석시 유체는 비압축성 공기로 가정하였으며, 공기밀도는 1.225kg/m^3 , 입력압력 $p_i=0.4\text{MPa}$ 로 설정하였다. 해석에서 난류모델로는 (k- ϵ) 모델을 적용하였으며 해석시간의 단축을 위해 1/4 대칭 조건을 반영하였다. 해석모델의 원주에 해당하는 벽면에는 경계층에 대한 영향을 고려하기 위해 임플리케이션 기능을 이용하여 5개의 층으로 된 격자망으로 조밀하게 구성하였다. 본 해석에 사용된 유한요소는 사면체 요소이며, 요소의 크기는 0.7mm로 하였다. 그리고 총 사용된 요소의 개수는 7,730,714개 이다.

2-2. 표준형 브라스팅 노즐의 유동해석

Fig. 3의 (a)는 표준형 벤츄리 보어 노즐의 유동해석 후 노즐 출구로부터 65mm 위치의 벽면에 유체가 부딪힐 때의 압력분포를 보여준다. Fig. 3의 (b)는 (a)를 그래프로 표현한 것이다. Fig. 3으로부터 유효 반경 R_e 가 0mm인 노즐의 중심에서 유효 압력 p_e 가 약 0.45MPa이고 원주방향으로 갈수록 유효 압력이 점차 감소하여 유효 반경 R_e 가 12mm일 때부터 거의 0에 근접한다. 이로부터 유동해석을 통해 얻은 표준형 벤츄리형 노즐의 유효 세정 반경은 R_e

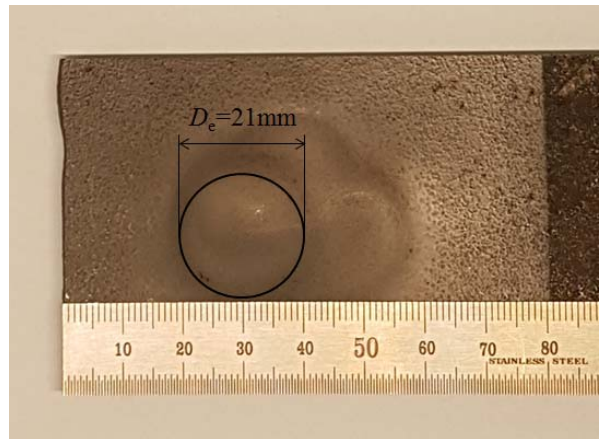


Fig. 4 Effective cleaning area after blasting test of standard nozzle

가 약 6.5mm로 예측된다.

2-3. 표준형 브라스팅 노즐의 세정 성능시험

Fig. 4는 실제 산업용 표준형 벤츄리 보어 노즐을 이용하여 분사성능 시험 후 시편 표면에서 연마된 후의 세정 면적을 보여준다. 브라스팅 성능시험 조건은 유동해석 모델에 반영한 조건과 동일하게 입력압력을 0.4MPa로 하였으며, 노즐 출구로부터 시편 표면까지의 거리를 65mm로 하였다. Fig. 4로부터 표준형 브라스팅 노즐의 유효 성능을 갖는 직경 D_e 는 약 21mm 내외로 확인되었다. 본 연구에서 표준형 노즐의 유동해석 후 예측한 유효 세정 반경 $R_e(=D_e/2)=10\text{mm}$ 이다. 실험 후 측정한 유효 반경 ($R_e=D_e/2$)과 거의 같은 값을 주었으며 이로부터 본 연구에서 수행한 유동해석 모델 및 해석조건 설정의 유효성을 확인하였다. 이는 광폭의 노즐 설계에 반영된다.

3. 광폭 브라스팅 설계 노즐의 유동해석 및 성능실험

3-1. 광폭 브라스팅 설계 노즐의 유동해석 모델 수립

넓은 면적을 대상으로 짧은 시간에 표면 세정이 가능하기 위해서는 상용 노즐과 같이 출구 단면적이 원형이 아닌 가로 폭을 넓히고 세로 폭을 감소시킨 광폭 노즐이 유용하다. 본 연구에서는 이 점에 착안하여 출구 단면적이 선 형상에 가까운 광폭 노즐 라이너 두 개(모델 A 및 모델 B)를 설계하였다. Fig. 5는 이들 두 노즐 라이너의 형상 및 제원을 보여준다. Fig. 5의 (a)는 모델 A 노즐로서 입구 직경이 25mm이고, 내부의 최소 직경은 17mm, 출구 단면의 가로 폭은 70mm, 세로 폭은 중앙부위가 3mm,

좌우 끝 부분은 2.468mm이다. 그리고 노즐 라이너의 총 길이는 200mm이다. 또한 Fig. 5의 (b)는 모델 B 노즐로서 입구 직경은 A 모델과 같이 25mm로 동일하고, 내부의 최소 직경은 20mm로서 A 모델보다 크게 설계되었다. 또한 출구 단면의 가로 폭은 70mm이고 세로 폭은 중앙부위가 3mm, 좌우 끝 부분은 2.244mm이다. 그리고 모델 B 노즐 라이너의 총 길이는 3차원 프린팅 공정으로 제조할 경우 시간 및 재료절감을 위해 150mm로 하였으며 모델 A보다 작다. 이들 두 노즐 라이너 모델들에 대해 Fig. 6의 (a) 및 (b)와 같이 유동해석 모델을 수립하였다. 두 모델 모두 유체가 흐르는 노즐 라이너의 내부를 3차원 격자로 구성하여 유동해석 모델을 수립하였으며, 앞서 표준형 노즐의 유동해석 모델과 같이 사용된 유체는 비압축성 공기로 가정하였다. 공기밀

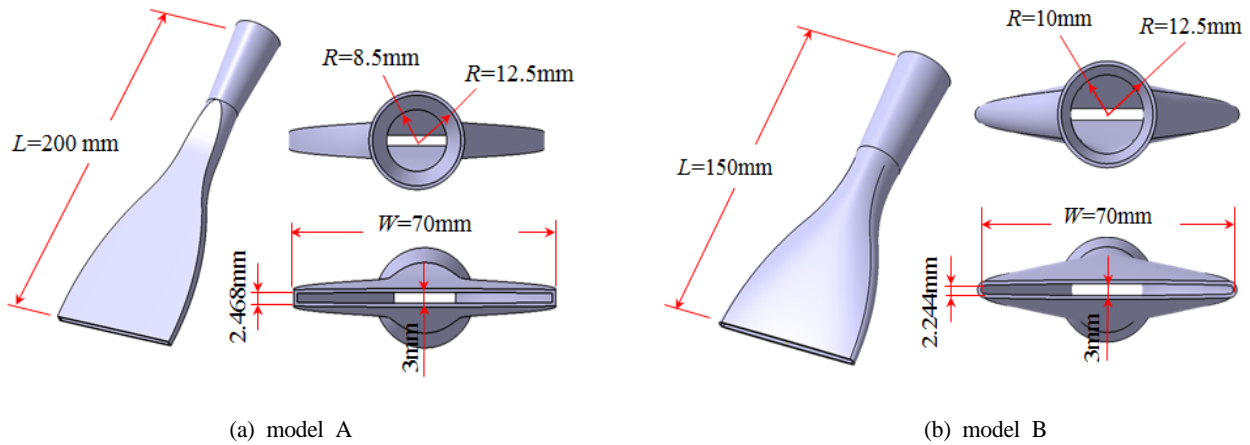


Fig. 5 Two designed nozzles with wide bores

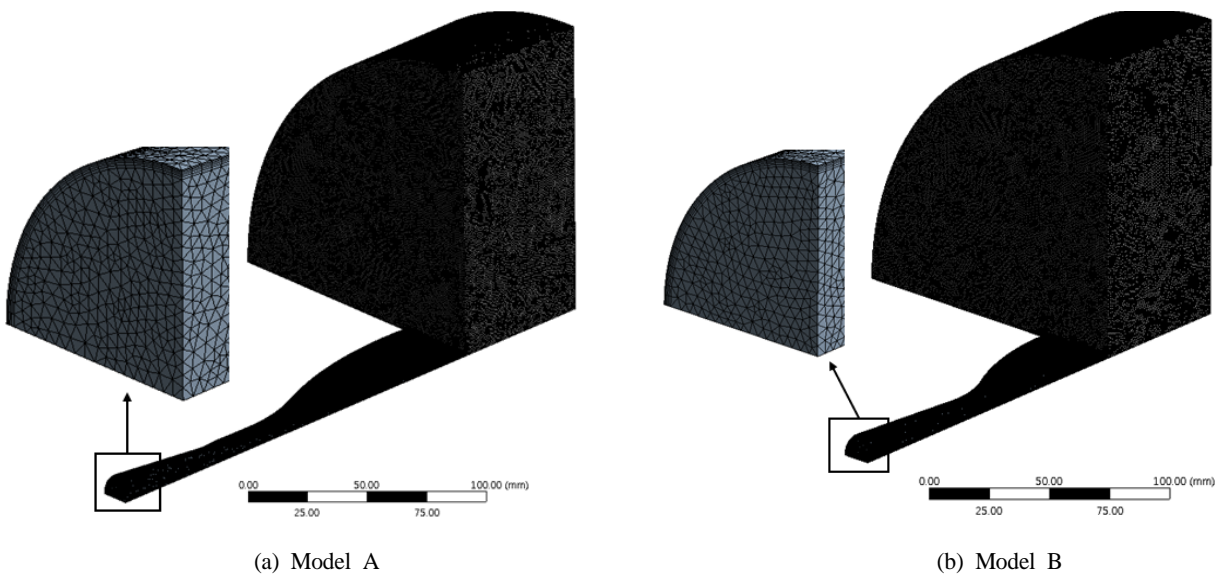


Fig. 6 Flow analysis models of wide bore nozzles

도는 1.225kg/m^3 , 입력 압력 $p_i=0.4\text{MPa}$ 로 설정하였고 난류 모델 또한 (k- ϵ) 모델을 적용하였으며 해석 시간의 단축을 위해 1/4 대칭 조건을 반영하였다. 해석모델의 입구 측 원주에 해당하는 벽면에는 경계층의 영향을 고려하여 인플레이션 기능을 이용한 5개의 층으로 된 격자망으로 조밀하게 구성하였다. 본 해석에 사용된 유한요소는 사면체 요소이며, 요소의 크기는 0.7mm로 하였다. 그리고 총 사용된 요소의 개수는 모델 A의 경우 8,014,595개, 모델 B의 경우 8,055,335개이다. 그리고 노즐 출구로부터 65mm 떨어진 위치에 평판모델을 수립하였으며, 유동해석 후 이 평판에 유체가 부딪힐 때의 압력분포를 얻어 유효한 세정 면적을 선정한다.

3-2. 광폭 브라스팅 설계 노즐의 유동해석

Fig. 7은 설계된 광폭 블라스팅 노즐의 3차원 유동해석 후 유선의 형태를 보여준다. 모델 A 및 B 모두 비압축성 유체인 공기가 65mm 떨어진 평면에 부딪히기까지 가로 폭이 넓고 세로 폭이 좁은 형태로 진행하다 평면에 부딪히면서 사방으로 비산됨을 알 수 있다. Fig. 8은 설계된 광폭 노즐의 출구로부터 65mm 떨어진 마모판에 가해진 압력분포를 등고선 형태로 보여준다. 모델 A 및 B 노즐 모두 노즐의 중심으로부터 가로 폭 방향(x 방향)을 따라 길고 균등한 압력분포를 갖는다. 또한 Fig. 9는 Fig. 8의 등고선 형태로 표현된 압력분포를 그래프로 표현한 것이다. Fig. 9의 (a)는 모델 A 노즐로서 $W/2=40\text{mm}$

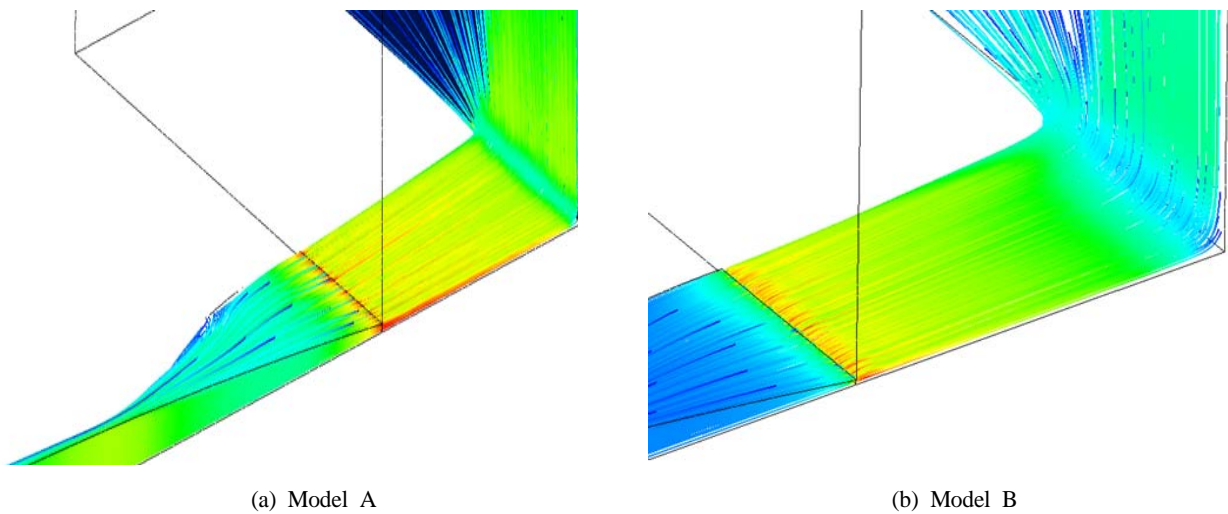


Fig. 7 Flow velocity distribution after incompressible flow analysis

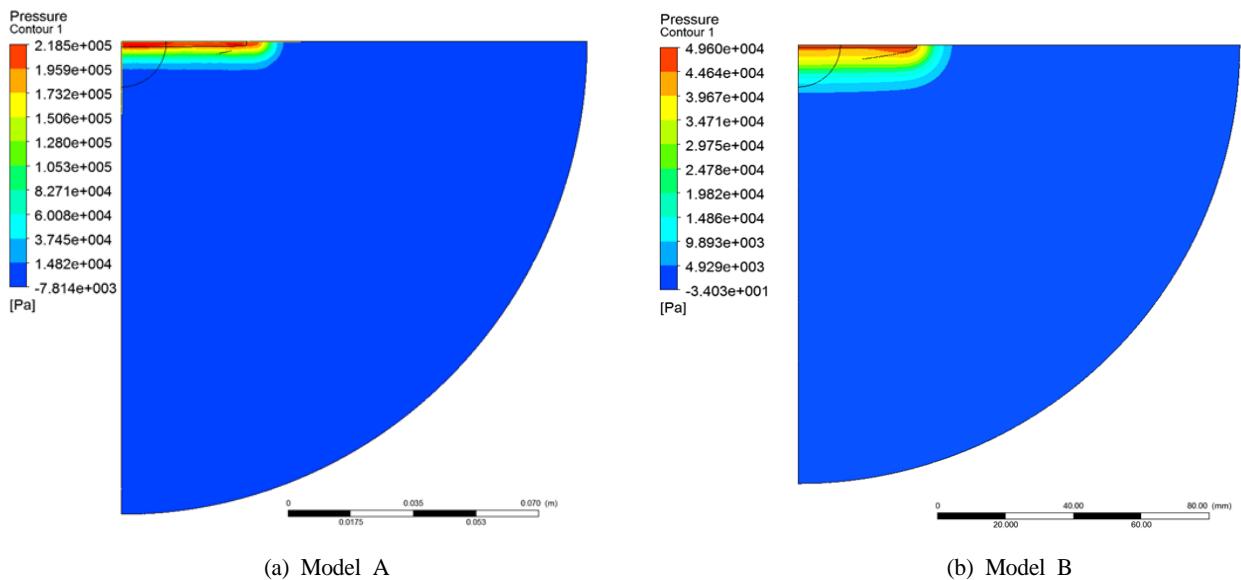


Fig. 8 Pressure distribution contours after incompressible flow analysis of wide bore nozzles

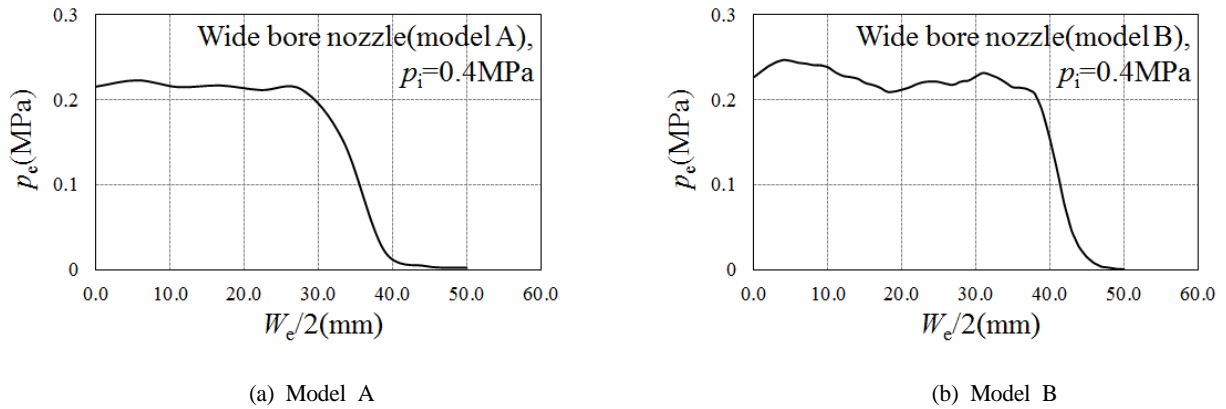


Fig. 9 Pressure distribution after incompressible flow analysis of wide bore nozzles

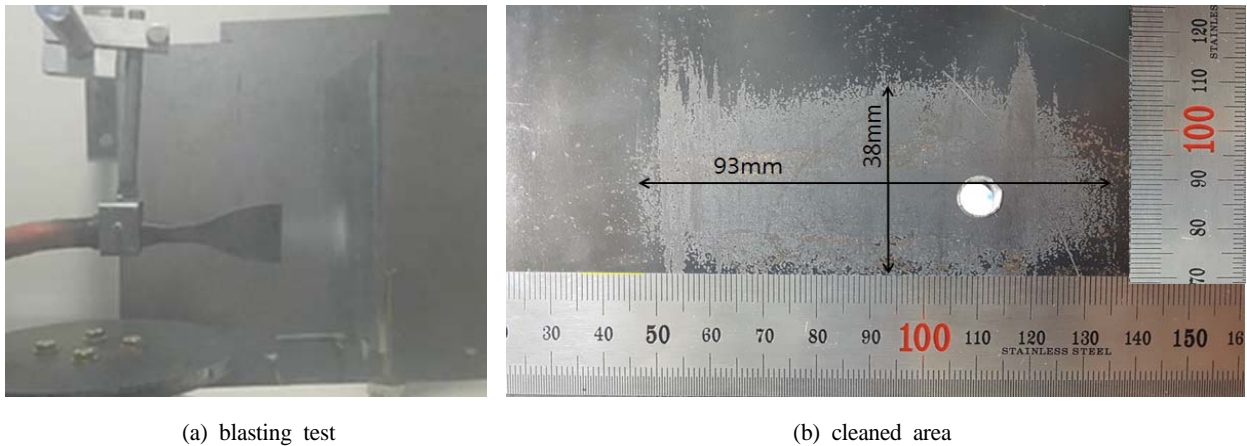


Fig. 10 Cleaning performance test of the wide bore nozzle A

로서 약 80mm의 가로 폭에 해당하는 유효 세정 길이를 제공한다. 이와 달리 (b)는 모델 B 노즐로서 출구 단면의 좌우측 세로 폭 높이가 모델 A보다 작은 경우이며 해석 후 $W_c/2=48\text{mm}$ 로서 약 96mm의 가로 폭에 해당하는 유효 세정 길이를 제공한다. 이로부터 본 연구에서는 두 모델 중 B 모델의 유효 세정 길이가 커 이를 브라스팅 효율을 더욱 향상시킬 수 있는 모델로 선정하였으며 다음 절에서 이들 두 모델들에 대한 성능시험을 수행하였다.

3-3. 광폭 브라스팅 설계 노즐의 세정 성능시험

광폭의 브라스팅 노즐에 대한 성능을 확인하기 위해 3차원 프린팅을 이용하여 성능시험용 시제 노즐을 제작하였다. 3차원 프린팅에 사용된 필라멘트는 PLA(Black) 소재를 사용하였으며, 브라스팅 장비와 연결된 분사용 호스와 장착 및 탈착이 가능하도록 하였다. 그리고 유동해석 결과와 비교하기 위해 해석에 반영한 조건들을 동일하게 적용하였다. 입력 압력 4bar(=0.4MPa)을 노즐 입구에 반영하였

고, 노즐 출구로부터 65mm 떨어진 곳에 스틸 판재를 설치하여 분사 후 표면에 연마되는 면적을 살펴볼 수 있도록 하였다. 분사시간은 15초로 설정하였다. 먼저 Fig. 10과 같이 모델 A 노즐에 대한 브라스팅 세정 성능시험을 수행하였다. (a)는 시제 노즐을 브라스팅 장비에 장착하여 세정용 입자가 분사되는 모습을 보여준다. (b)는 브라스팅 세정 공정 후 평판 시편에 마모된 영역을 나타내며 가로 폭과 세로 폭의 유효 크기를 보여준다. 성능시험 후 유효 장폭은 93mm, 단폭은 38mm로서 넓은 세정 면적에 직접적인 영향을 주는 가로 폭 길이를 중심으로 해석 후 얻은 유효 장폭 $W_c=80\text{mm}$ 보다 컸으며 다소 오차를 보였다. Fig. 11은 모델 B 노즐에 대한 브라스팅 세정 성능시험을 보여준다. (a)는 시제 노즐을 브라스팅 장비에 장착하여 세정용 입자가 분사되는 모습을 보여준다. (b)는 브라스팅 세정 공정 후 평판 시편에 마모된 영역을 나타내며 가로 폭과 세로 폭의 유효 크기를 보여준다. 성능시험 후 유효 장폭은 105mm, 단폭은 38mm로서 모델 A 노즐보다 장폭의 크기가 컸으며 해석 후 얻은 유효 장폭

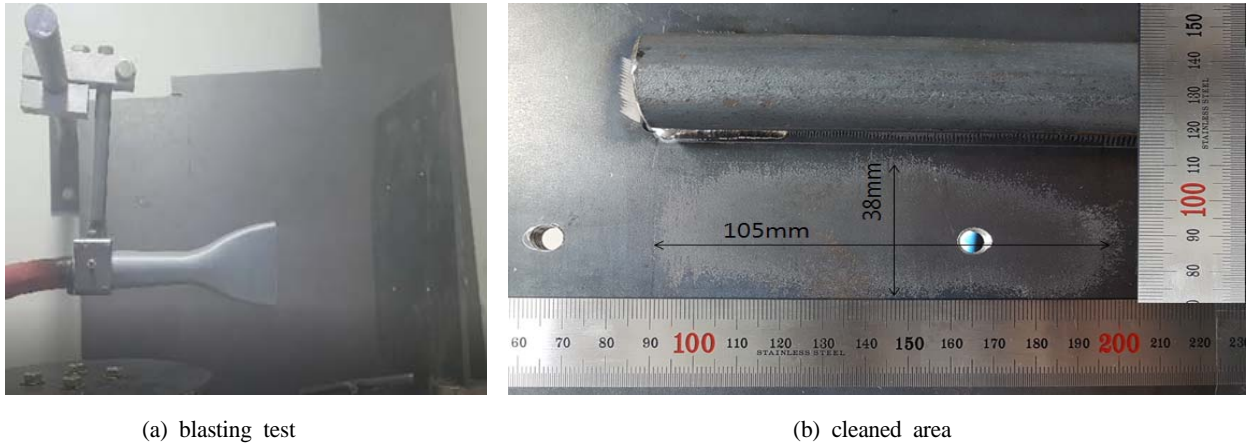


Fig. 11 Cleaning performance test of the wide bore nozzle B

$W_c=96\text{mm}$ 보다 큰 값을 주어 (a)의 결과와 같이 오차를 주었다. 이들 두 모델들 모두 다소 오차를 보이긴 하나 모델 A보다는 모델 B의 유효 세정 길이가 증가하였다는 점에서 비압축성 유동해석에 기초한 광폭 브라스팅 노즐의 정성적인 성능예측이 가능한 것으로 판단하였다.

4. 결론

본 연구에서는 대면적 표면 세정이 가능한 광폭의 출구 단면을 갖는 블라스팅 노즐을 설계하기 위해 비압축성 유동해석을 수행하였다. 이후 3차원 프린팅으로 시제품을 제작하고 성능시험을 수행하였으며 해석결과와 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표준형 브라스팅 노즐을 설계한 후 비압축성 유동해석을 수행하였으며 유효 세정 직경은 20mm로 예측되었다. 표준형 브라스팅 노즐을 이용한 세정 성능시험을 통해 얻은 유효 세정 직경은 21mm 내외로서 해석값과 거의 근사한 값을 주었다. 이로부터 본 연구의 해석방법을 광폭 노즐 해석에 적용하였다.

2. 출구 단면의 장폭이 70mm, 단폭의 중앙부가 3mm이고 좌우측이 2.885mm인 모델 A 노즐과 장폭이 70mm, 단폭의 중앙부가 3mm이고 좌우측이 2.244mm인 모델 B 노즐에 대한 유동해석을 수행하였으며, 해석 후 모델 B 노즐이 모델 A보다 세정 면적의 장폭 크기가 컸다.

3. 모델 A 및 B 노즐을 3차원 프린팅으로 출력 및 제조하여 브라스팅 장비에 장착한 후 해석조건과 동일하게 성능시험을 수행하였다. 실험 후 모델 B 노즐이 모델 A 노즐보다 세정 면적의 장폭 크기가 컸으며 해석결과와 일치하였다.

4. 궁극적으로 본 연구에서 비압축성 유체를 이용한 유동해석을 기반으로 설계된 광폭 브라스팅 노즐의 정성적인 성능예측이 가능한 것으로 판단되며 이 연구결과는 추후 압축성 유동해석을 위한 선행 연구 자료로서 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

후 기

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

References

1. 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.
2. 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.
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. 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.
5. Raykowski, A., Hader, M., Maragno, B., Spelt, J. K., 2001, Blast cleaning of gas turbine components: deposit removal and substrate deformation,

- Wear, Vol. 249, pp. 126-131.
6. Ruslan, M., Fengzhou, F., 2019, Theoretical study on particle velocity in micro-abrasive jet machining, Powder Technology, Vol. 344, pp. 121-132.
 7. Haixia, L., Joohong C., Bin, L., Ire, K., Jungwon, H., 2016, Numerical analysis on the gas flow dynamics from a rectangular slot-nozzle for pulse cleaning of filter unit, Powder Technology, Vol. 297, pp. 330-339.
 8. Huaizhong, L., Ann, L., Jingming, F., 2014, On DEM - CFD study of the dynamic characteristics of high speed micro-abrasive air jet, Powder Technology, Vol. 267, pp. 161-179.
 9. Ruslan, M., Fengzhou, F., 2018, Recent advances and challenges of abrasive jet machining, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 22, pp. 1-20.
 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.