

전산유체해석을 이용한 Fan Filter Unit(FFU)의 가이드 베인 형상설계

장준환* · 안 준**† · 명현국**

* 국민대학교 대학원 기계공학과, * 국민대학교 기계시스템공학부

CFD Based Shape Design of Guide Vane for Fan Filter Unit

Jun Hwan Jang*, Joon Ahn**† and Hyon Kook Myong**

* Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin Univ.,

** School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin Univ.

(Received April 9, 2013 ; Revised May 9, 2013 ; Accepted May 16, 2013)

Key Words: Fan Filter Unit(팬 필터 유닛), Velocity Uniformity(속도 균일도), Flow Rate(유량), CFD(전산유체해석), Guide Vane(가이드 베인), Shape Design(형상설계)

초록: 팬 필터 유닛 (FFU)은 청정실 천정에 설치되어 정화된 공기를 공급하는 장치이다. FFU가 대형화되면서 출구면에서 속도가 불균일해지고 결과적으로 청정실에서 생산되는 제품의 품질 또는 생산성을 떨어뜨리게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 가이드 베인이 설치되는데 가이드 베인은 속도를 균일하게 하지만 유동저항을 유발하여 동력이 일정하게 주어진 경우 공급되는 유량을 감소시킨다. 따라서 속도 균일성을 확보하면서 유량 감소를 최소화하는 최적설계가 요구된다. 본 연구에서는 FFU의 외벽과 중앙에 설치된 가이드 베인의 각도와 길이를 변경하면서 수치해석을 수행하여 가이드 베인의 성능 개선 방안을 도출하였다. 외벽에 설치된 가이드 베인의 경우, 형상을 변경하여 유량이 1.5% 감소하는 조건에서 속도 균일도를 3.7% 향상시킬 수 있었다. 중앙 가이드 베인의 경우 유량이 0.7% 감소하는 조건에서 속도 균일도를 2.9% 향상시킬 수 있었다.

Abstract: A fan filter unit (FFU) is a device which supplies clean air from the ceiling in a clean room. With an increase in its size, velocity variation occurs within the exhaust plane and this damage the product quality or productivity. Hence, a guide vane is installed inside the device to enhance the velocity uniformity. Because the vane reduces the flow rate for a given pumping power, an optimum design is required to achieve velocity uniformity while minimizing the flow rate reduction at the same time. To find a geometry that satisfies these requirements, a series of numerical simulations has been conducted while changing the angle and length of the guide vanes. By changing the geometry of the side guide vane, the velocity uniformity increased by 3.7% and the flow rate decreased by 1.5%. For the center guide vane, the velocity uniformity increased by 2.9% and the flow rate decreased by 0.7%.

- 기호설명 -

l_c	: 중앙 가이드 베인 길이	[m]
l_s	: 외벽 가이드 베인 길이	[m]
θ_c	: 중앙 가이드 베인 각도	[°]
θ_s	: 외벽 가이드 베인 각도	[°]

1. 서론

우리나라 국가 경제에 큰 영향을 주고 있는

LCD(Liquid Crystal Display), FPD(Flat Panel Display) 등의 제조공정은 청정실(clean room)에서 이루어진다. 청정 환경을 유지하는 방법으로는 청정 터널(clean tunnel module), 축류팬(axial fan), 국소환경(mini-environment) 시스템 등이 있는데⁽¹⁾ 본 연구에서는 팬 필터 유닛(fan filter unit, 이하 FFU로 칭함)에 관련한 연구를 수행하였다.

FFU는 청정실 천정에 설치되어 하부로 청정공기를 공급하여 하강기류를 생성시킴으로써 오염을 줄이는 장치로서 Fig. 1(a)에 보인 것과 같이 하우스 내부에 소형 팬(fan)과 고효율 입자-공기

† Corresponding Author, jahn@kookmin.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

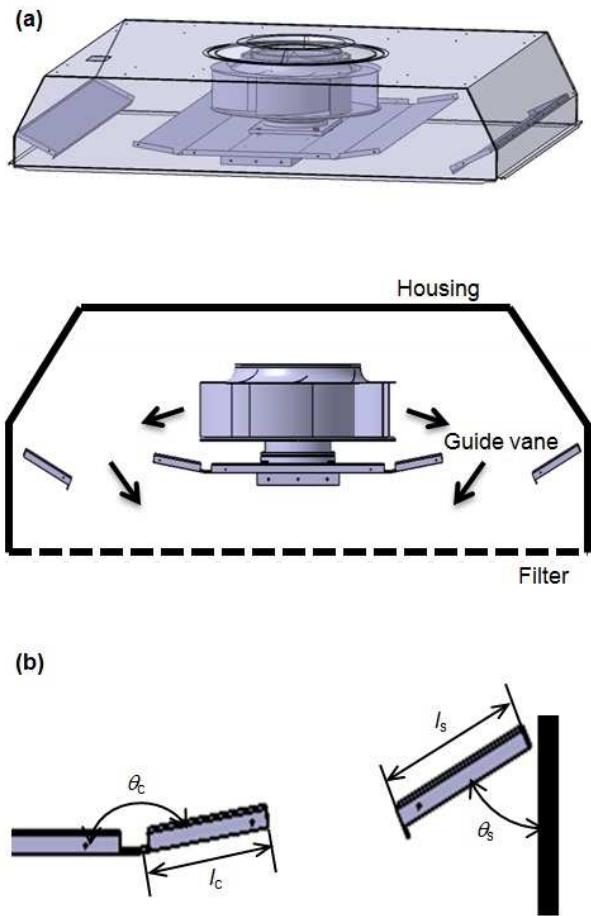


Fig. 1 Fan filter unit (FFU) and guide vanes; (a) Schematic drawing; (b) Design parameters of guide vanes

(High-Efficiency-Particulate Air: HEPA) 필터, 또는 초저침투 공기(Ultra Low Penetration Air: ULPA) 필터로 구성되며,⁽²⁾ 일반적으로 FFU에서는 Fig. 1(a)와 같이 팬 상부로 유입된 공기가 팬이 회전함에 따라서 회전축과 수직하는 방향으로 빠져나가는 유동이 형성된다. 이때 유동은 하우징 중앙과 외측에 설치된 가이드 베인에 의하여 유동의 방향이 바뀌게 되며, 최종적인 유동은 하우징 하부의 출구면으로 빠져 나가게 된다.

최근 LCD 패널이 대형화됨에 따라서 FFU 또한 대형화되고 있는 추세이다.⁽³⁾ 대형 FFU 장비의 경우, 중심부 및 외곽 쪽의 기류 편차가 발생하여 제품의 품질이나 생산성을 떨어뜨릴 수 있다. 출구에서의 속도 균일도를 확보하는 방안으로 FFU 내부에 가이드 베인(guide vane)을 설치하는 방법이 사용되고 있는데 속도 균일도는 개선되는 반면 가이드 베인에 의한 추가적인 압력강

하로 인해 유량이 감소하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 속도 균일도를 확보하는 동시에 유량 저감을 최소화하는 최적설계가 요구된다.

청정실과 같은 넓은 공간에서의 편류에 대한 영향은 청정실 특성상 실제적인 평가가 어렵기 때문에⁽²⁾ 전산유체역학(CFD) 기법을 이용한 연구들이 널리 수행되어 왔다. 청정실에 FFU를 설치한 경우에 대한 연구로서 FFU가 설치된 청정실의 전체적인 유동특성,⁽⁴⁾ 제품과 FFU의 배치에 따른 오염물질의 전파특성을 관찰한 연구,⁽¹⁾ 장비 유무에 따른 점유상태, 필터와 다공패널의 배치, 하부 청정실의 높이 등을 변수로 하고 평가지표로서 편향각과 기류 균일도를 사용한 편류 개선에 대한 연구가^(5,6) 발표된 바 있는데 FFU 자체보다는 청정실 자체의 기능향상에 초점을 맞추고 있다. FFU 자체에 대한 연구로서는 평가지표 마련 및 기법구축,⁽²⁾ 에너지 절감을 위한 유량제어 기법⁽³⁾ 등의 연구가 발표되고 있지만, FFU의 가이드 베인 개선에 따른 FFU 자체의 유동 균일도를 향상시키는 연구는 아직 보고되지 않고 있다. 다만, 열회수 보일러의 연결 덕트, 튜블러 수차, 수중 덕트 등에서 가이드 베인의 형상,⁽⁷⁾ 각도,⁽⁸⁾ 설치 위치⁽⁹⁾ 등을 변경하여 유동 균일도를 높인 사례들이 발표되고 있다.

본 연구에서는 먼저 FFU에서 기존 형태의 가이드 베인이 설치되어 있는 경우에 대하여 수치 해석을 수행하고 실험결과와 비교하여 FFU 해석에 가장 적합한 CFD 기법을 도출하였다. 최적의 가이드 베인 형상을 도출하고자 Fig. 1(b)와 같이 중앙 가이드 베인과 외측 가이드 베인의 길이와 각도를 변수로 설정하여 수치 해석을 수행하였다. 수치 해석 결과로부터 각각의 변수가 FFU의 출구면에서 속도분포 균일성 및 유량 저감에 미치는 영향을 고찰하였고 속도 균일도를 최대한 확보하면서 유량 저감을 최소화 할 수 있는 형상을 도출하였다.

2. 수치해석 기법

본 연구에서는 설계변수에 따른 해석에 앞서 수치해석으로 예측한 FFU의 발생유량 및 속도 균일도의 정확도를 검증하기 위하여 기존 형상에 대하여 기존 실험을 수행하였다. 실험 장치는 Fig. 2(a)에 제시하였다. 다공체 모형에 따른 오차를 배제하기 위하여 필터(filter)를 제거하고 속도

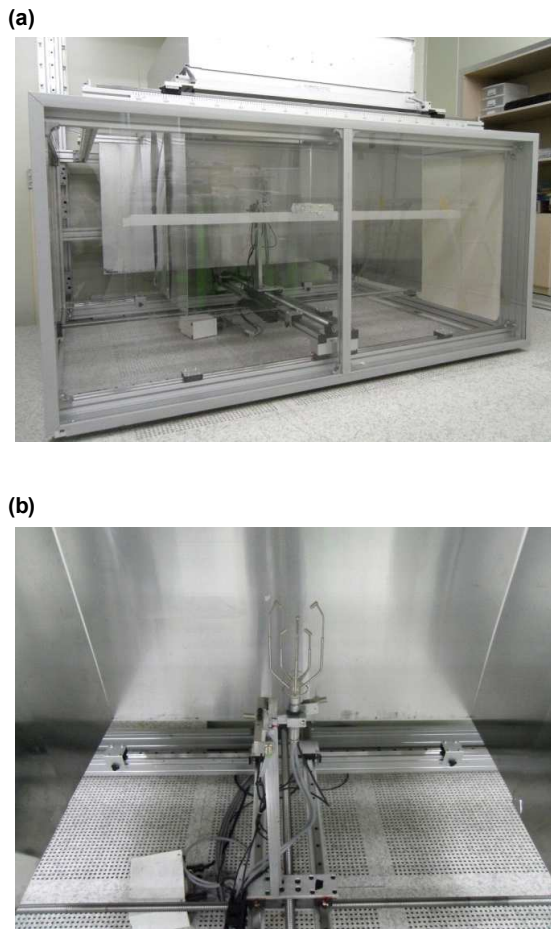


Fig. 2 Experimental setup for validation test; (a) Photograph of the test rig; (b) Velocity sensor

센서(Fig. 2(b))를 FFU 출구에서 30 cm 하류 위치에 설치하였다. 설치위치에서 측정 면을 동일 면적의 36개 구역으로 구분하여 속도분포를 측정하였다.

계산영역은 FFU를 회전부인 팬과 고정부인 하우징(housing)으로 나누어 모델링하였다(Fig. 3). 연구목표가 속도 균일도 개선과 유속 저감의 최소화이기 때문에 필터가 없는 조건에서 속도 균일도를 최대화 한다면, 필터를 설치해도 높은 균일도를 얻을 수 있을 것으로 가정하여 필터 부분은 해석과정에서 생략하여 보다 경제적인 해석이 되도록 하였다.

격자는 팬(fan)에는 약 1만개의 육면체 격자를 사용하였고(Fig. 3(a)), 하우징에는 약 120만개의 사면체와 육면체 격자를 사용하였다(Fig. 3(b)). 팬은 회전부이기 때문에 이동격자(moving mesh)를

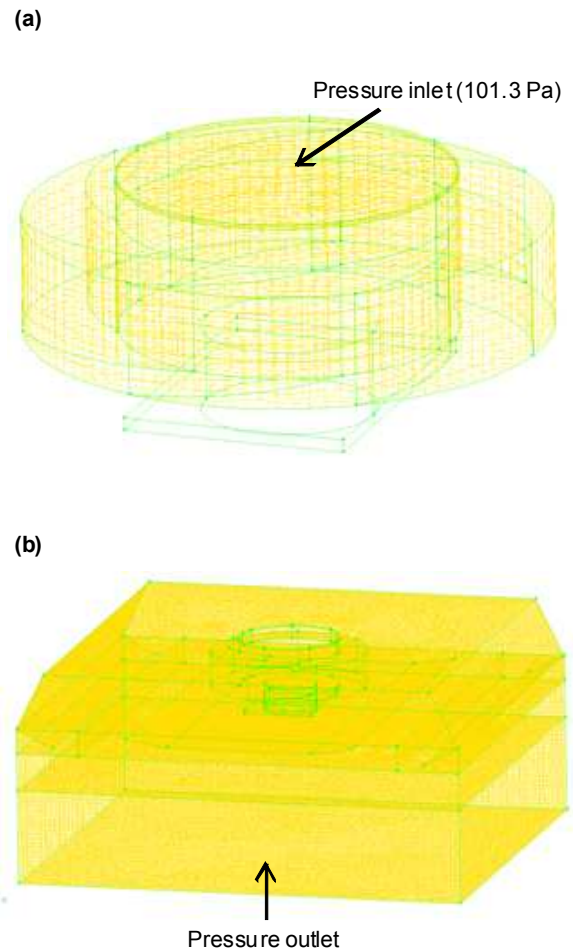


Fig. 3 Computational modeling; (a) Grid system for the fan; (b) Computational domain

사용하였다. 경계조건으로 팬의 상부에 위치한 공기가 흡입되는 부분은 압력 입구조건을 주었으며, 하우징 하부의 출구면은 유동 박리영역 및 실제 실험 시 측정되는 위치를 고려하여 압력 출구조건을 적용하였다. 회전부와 고정부가 만나는 면은 인터페이스(interface) 조건을 설정하였다.

전반적인 수치해석에는 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하였고, 난류 모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 계산조건은 외측 가이드 베인의 경우 가이드 베인의 형상이 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 가이드 베인의 길이와 각도를 변화시키며 수치해석을 수행하였다. 길이는 기존 제품의 형상을 기준으로 40 mm를 증가 및 감소시킨 형상에 대하여 해석하였다. 각도는 기존 각도에 대하여 20°, 10° 감소한 경우 및 10° 증가한 경우에 대하여 각각 계산을 수행하였다.

Table 1 Code validation results

	Mass flow rate (kg/s)	Standard deviation of velocity (m/s)
CFD	4.55	1.31
Experiment	4.32	1.08
Relative error (%)	5.32	21.5

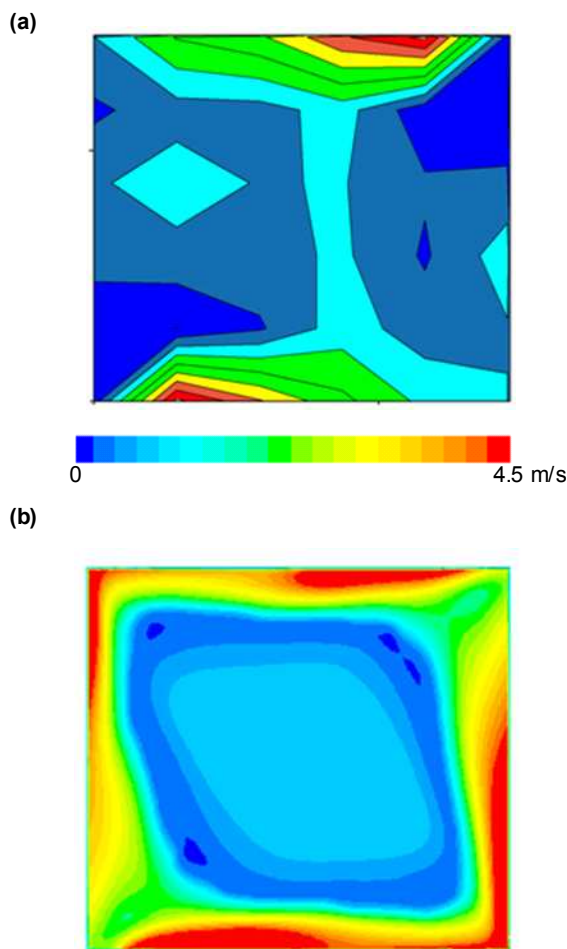


Fig. 4 Velocity distributions at the downstream of the unit with existing guide vanes; (a) Experimental data; (b) Numerical results

중앙 가이드 베인의 경우는 외측 가이드 베인을 130.3 mm, 43.4°로 고정시킨 후 중앙 가이드 베인을 기존 길이에 대하여 40 mm, 80 mm 증가시킨 경우와 기존 각도에 대하여 20°, 10° 감소시킨 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 중앙 가이드 베인을 해석할 때, 외측 가이드 베인은

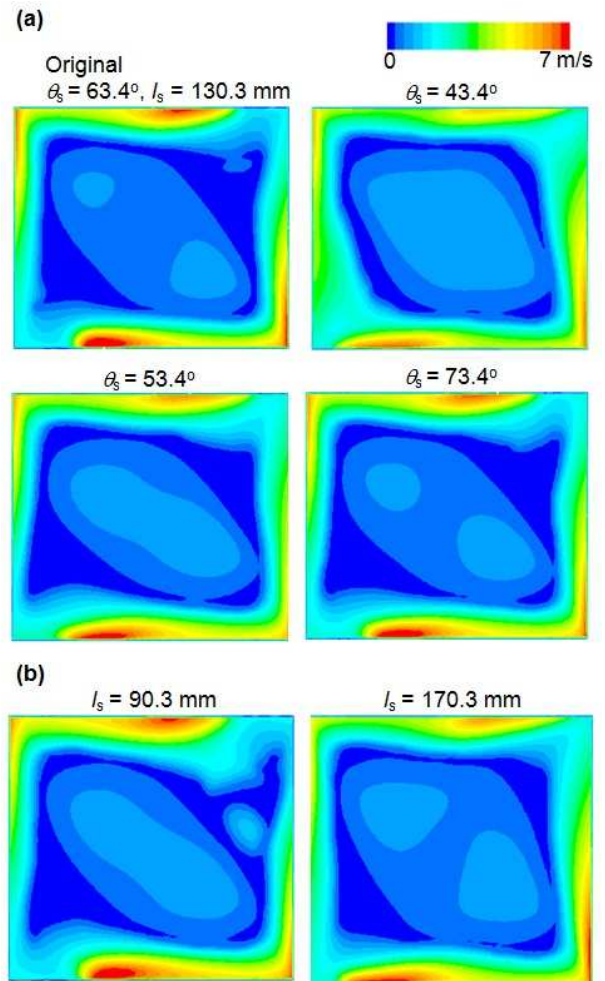


Fig. 5 Velocity distributions at the downstream according to geometric change of the side guide vane; (a) Angle effect; (b) Length effect

수치해석 결과 43.4°일 때 가장 좋은 성능을 보였기 때문에 43.4°로 고정하였다. 팬의 회전속도는 모든 경우에 대하여 제품의 설계 조건인 1450 rpm로 고정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 수치해석 검증

본 연구의 수치해석을 수행하기에 앞서 수치해석 기법 및 격자계의 적절성을 검증하기 위해 기존 형상에 대하여 표준 조건에서 실험을 수행하고 수치 해석한 결과를 비교하였다. Table. 1에 정리한 바와 같이 실험결과와 수치해석 결과가 유량은 약 5%, 속도의 표준편차는 약 20%의 차이를 나타냈다. 표준편차의 경우 다소 차이를 보이지만 측정지점의 위치, 측정지점 수, 센서의 민

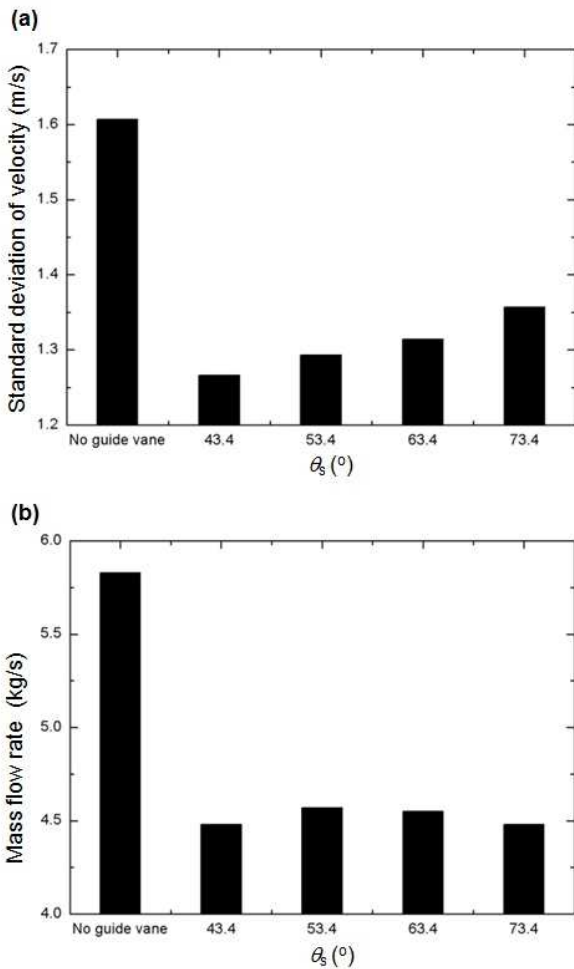


Fig. 6 Effects of the angle of the side guide vane on the fan filter performance; (a) Velocity uniformity; (b) Mass flow rate

감도 등을 고려하여 볼 때 전반적으로 일치하는 결과를 보여주고 있다. 출구 면에 대한 통계량 뿐 아니라 출구에서의 국소적인 속도분포를 비교하여 보았을 때에도(Fig. 4), 중심부에서 저속인 영역이 형성되고 상하로 고속 영역이 형성되는 분포를 관찰할 수 있어, 정량적으로 유사한 결과를 보여주고 있다고 판단된다.

3.2 외측 가이드 베인의 형상 설계

가이드 베인의 각도 및 길이 변화에 따른 먼 풍속 형태를 Fig. 5에 제시하였다. 본 연구에서 고려한 외측 가이드 베인의 모든 각도 범위 및 길이에 대하여 전체적인 유속분포는 외곽 쪽으로 기류가 몰리고 상대적으로 중심부에는 풍속이 낮게 나오는 분포를 보인다. 각도의 영향을 보면 (Fig. 5(a)), 각도를 20° 감소시킨 경우($\theta_s = 43.4^\circ$)

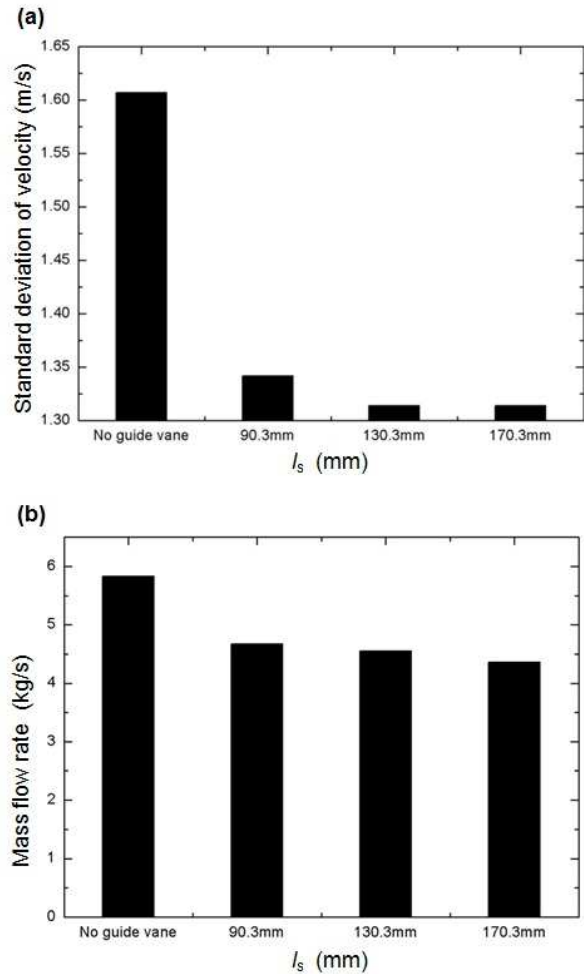


Fig. 7 Effects of the length of the side guide vane on the fan filter performance; (a) Velocity uniformity; (b) Mass flow rate

에서 외곽 쪽으로 몰린 기류가 상대적으로 적으며, 가장 균일하다고 볼 수 있다. 길이를 변경한 경우에는(Fig. 5(b)) 속도분포가 미세한 차이를 보이고 있지만, 상대적으로 가이드 베인의 각도를 변수로 설정하였을 때에 비해서 본 연구에서 고려한 범위 내에서는 유동형태에 미치는 영향이 크지 않음을 관찰할 수 있다.

Figure 6에는 가이드 베인 각도에 따른 속도균일도 및 유량 변화를 제시하였다. 속도의 표준편차는(Fig. 6(a)), Fig. 5에 제시한 속도분포에서 예상할 수 있듯이 가이드 베인 각도가 43.4° 일 때 가장 작고 각도가 증가할수록 속도 균일도가 떨어져 표준편차가 증가하는 경향을 보인다. 그러나 속도 균일도가 가장 우수한 43.4° 의 경우 유량도 가장 많이 감소하는 것을 볼 수 있다(Fig. 6(b)). 각각의 평가지표에 대하여 상반된 결과를

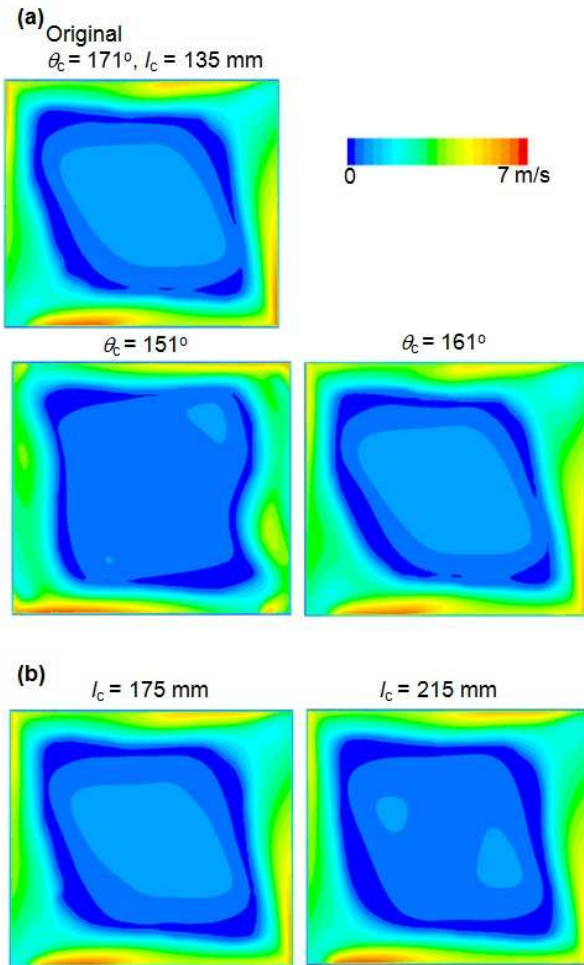


Fig. 8 Velocity distributions at the downstream according to geometric change of the central guide vane; (a) Angle effect; (b) Length effect

보이고 있지만, 본 연구에서는 속도 균일도 확보 후 유량 저감을 최소화하는 것을 목표로 하므로 43.4°의 경우가 가장 적합하다고 볼 수 있다. 유량 손실의 관점에서는 베인 각도를 10°를 감소시킨 53.4°에서 유량손실이 최소화되었다.

외측 가이드 베인의 길이에 따른 정량적 성능 변화는 Fig. 7에 제시하였다. 속도 균일도의 경우 (Fig. 7(a)), 기존 설계(130.3 mm)의 경우와 170.3 mm일 때 속도의 표준편차에 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 속도 균일도는 길이가 증가함에 따라서 향상되지만, 일정 길이 이후에는 일정하게 수렴하는 경향을 보였다. 외측 가이드 베인의 길이가 증가하면 유동 균일도는 향상되지만 유량이 감소한다(Fig. 7(b)). 유량만을 고려하면 90.3 mm일 때가 가장 유리하지만 균일도 측면에서는 현 상태를 유지하는 것이 바람직하다.

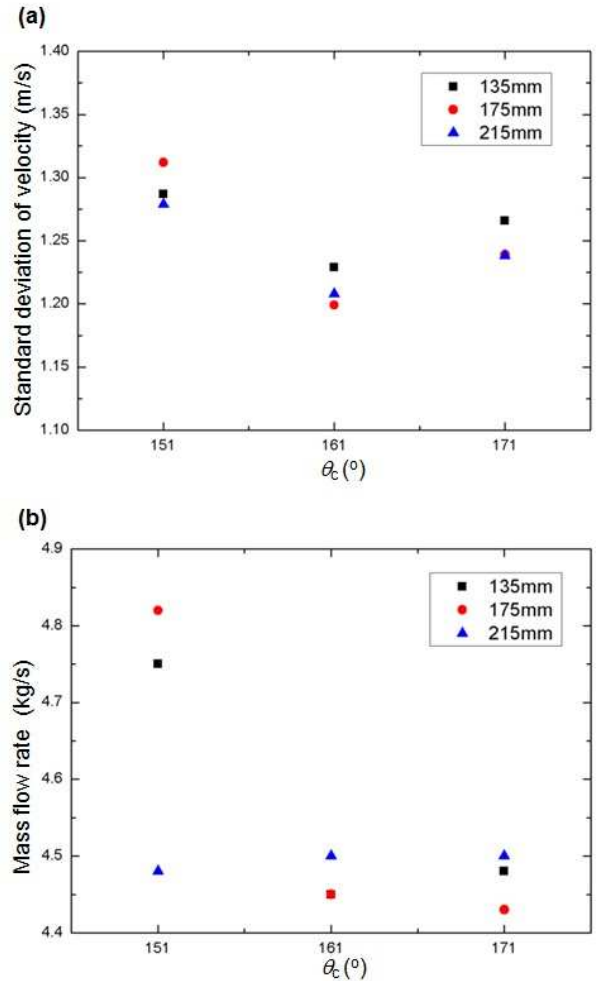


Fig. 9 Effects of the angle of the central guide vane on the fan filter performance; (a) Velocity uniformity; (b) Mass flow rate

3.3 중앙 가이드 베인의 형상 설계

중앙 가이드 베인의 각도는 기존 각도(171°)에서 10° 간격씩 줄이는 방향으로 수정하였다. 외측 가이드 베인을 20° 감소시켰을 경우($\theta_c = 43.4^\circ$)로 고정하고 중앙 가이드 베인을 161°, 151°로 변화시키면서 수치해석을 수행하였다. Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 10° 감소시켰을 경우에($\theta_c = 161^\circ$) 외곽 쪽으로 몰린 기류가 상대적으로 적은 분포를 보인다. 중앙 가이드 베인의 길이를 변화시켰을 경우(Fig. 8(b)), 각도를 변화시켰을 경우와 마찬가지로 속도분포 상에서 큰 변화를 보이지 않았지만, 기존 길이(135 mm)를 기준으로 비교하여 보았을 때, 80 mm를 늘려 주었을 경우($l_c = 215$ mm) 속도분포가 가장 균일하였다.

중앙 가이드 베인의 각도 변화에 따른 속도 균

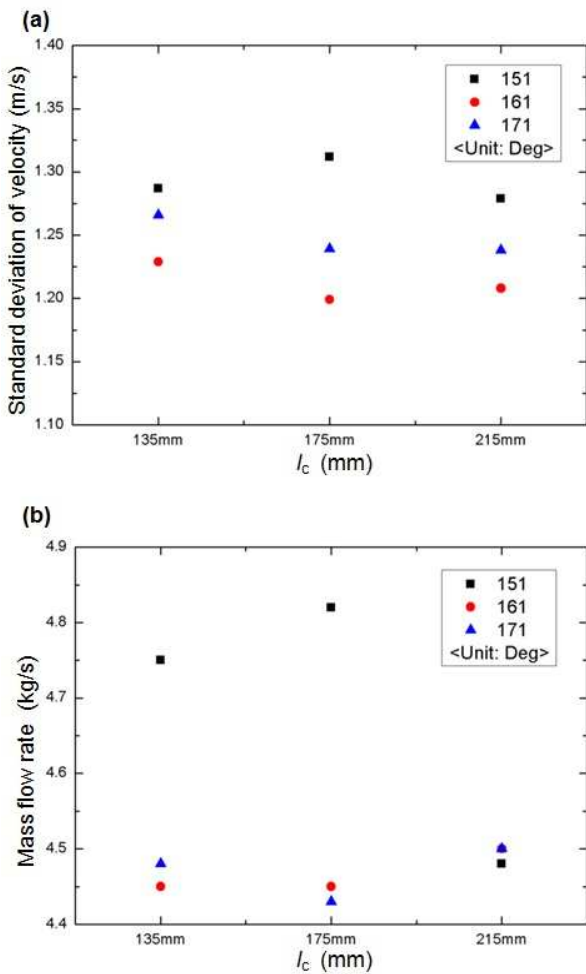


Fig. 10 Effects of the length of the central guide vane on the fan filter performance; (a) Velocity uniformity; (b) Mass flow rate

일도 및 유량을 비교하여 보았을 때, 모든 길이에서 161° 상태가 속도 균일도 측면에서 유리한 것으로 나타났다(Fig. 9(a)). 이때, 속도 표준 편차는 기존 각도에 비해서 2.9% 감소하였다. 유량의 경우에는 각도가 151°일 때 다른 각도에 비해서 유량이 상대적으로 높게 나왔다(Fig. 9(b)).

속도 균일도에서 가장 유리한 161°의 경우 질량 유량은 0.7% 감소하였다. 반면 유량에서 가장 유리한 151°의 경우에는 속도 표준편차는 1.7% 증가하였다. 따라서 평가지표를 속도 균일도에 맞출 경우 161°가 가장 적합함을 볼 수 있으며, 이 경우 속도 손실 또한 0.7% 감소에 불과하므로 최적의 개선안으로 볼 수 있다.

Figure 10(a)는 길이 변화에 따른 속도 균일도를 나타내고 있다. 각도를 수정하지 않은 171° 상태에서 길이를 증가시킬 경우 40 mm까지는 균일

도가 향상되지만 80 mm까지 증가시키면 효과가 없는 것으로 나타났다. 각도를 151°로 줄이면 길이를 증가시켜도 속도 균일도가 개선되지 않았다. 유량의 경우(Fig. 10(b)), 각도를 수정하지 않은 171° 상태에서 각 길이에 대한 유량을 비교하였을 경우, 40 mm 증가시킨 175 mm에서 유량이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 215 mm의 경우에는 모든 각도에서의 유량이 거의 일치하여 일정 길이 이상이 되면 각도는 더 이상 유량에 영향을 주지 못하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 FFU의 가이드 베인의 형상 변화에 따른 유동해석을 통해 속도 균일도 및 유량 변화를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가이드 베인 개선에 대한 수치해석을 수행하기에 앞서 수치해석에 대한 신뢰성 확보를 위한 검증작업으로 동일 조건에서의 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 수치해석의 타당성을 확인할 수 있었다.

(2) 외측 가이드 베인의 각도는 가장 작은 각도에서 유량 손실은 크지만, 속도 균일도가 가장 우수하였다. 따라서 평가지표를 속도 균일도에 맞출 경우 외측 가이드 베인의 각도를 줄이는 것이 유리함을 확인하였다.

(3) 외측 가이드 베인의 길이의 경우, 일정 길이 이후에는 균일도에 영향을 끼치지 않았고, 유량 저감 측면에서는 길이가 작을수록 유량 손실이 작음을 확인하였다.

(4) 중앙 가이드 베인의 각도는 속도 균일도에 대한 최적점이 존재하였다. 기존 각도에서 10°를 감소시켰을 경우(161°), 속도 편차가 모든 길이에 대하여 가장 작았다.

(5) 중앙 가이드 베인의 길이가 일정 길이 이상으로 길어지면 각도가 속도 손실에 영향을 주지 않는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 (주) 한국 E&C의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Noh, K.-C., Oh, M.-D. and Lee, S.-C., 2004, "A Study on the 3-D Airflow and Dynamic

- Cross Contamination in the Photolithography Process Clean Room," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 28, No. 5, pp. 560~568.
- (2) Xu, T., Lan, C.-H. and Jeng, M.-S., 2007, "Performance of Large Fan-filter Units for Cleanroom Applications," *Building & Environment*, Vol. 42, pp. 2299~2304.
- (3) Chen, J.-J., Lan, C.-H., Jeng, M.-S. and Xu, T., 2007, "The Development of Fan Filter Unit with Flow Rate Feedback Control in a Cleanroom," *Building & Environment*, Vol. 42, pp. 3556~3561.
- (4) Hu, S.C., Wu, Y.Y. and Liu, C.J., 1996, "Airflow Characteristics in Cleanrooms," *Building & Environment*, Vol. 31, No.2, pp. 119~128.
- (5) Noh, K.-C., Lee, H.-C., Kim, D.-Y. and Oh, M.-D., 2007, "Method of Particle Contamination Control for Yield Enhancement in the Cleanroom" *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 31, No. 6, pp. 522~530.
- (6) Hu, S.C. and Chuah, Y.K., 2003, "Deterministic Simulation and Assessment of Air-recirculation Performance of Unidirectional-flow Cleanrooms that Incorporate Age of Air Concept," *Building & Environment*, Vol. 38, No.4, pp. 564~570.
- (7) Lee, S., Ahn, J. and Shin, S., 2009, "Numerical Optimization of Temperature Distribution in HRSG System Using Inlet Guide Vane," *Trans. of the KSCFE*, Vol. 14, No. 3, pp. 1~8.
- (8) Nam, S.-H., Kim, Y.-T., Choi, Y.-D. and Lee, Y.-H., 2008, "Performance Characteristics of Small Tubular-type Hydroturbine according to the Guide Vane Opening Angle by Experiment and CFD," *Trans. of the KFMA*, Vol. 11, No. 5, pp. 44~49.
- (9) Yu, H.-R., Jung, Y.-R and Park, W.-G., 2004, "Numerical Flow Analysis of Ducted Marine Propeller with Pre-Swirl Guidevane," *Trans. of the KSCFE*, Vol. 9, No. 2, pp. 62~68.