

덕트의 유로 최적화를 통한 소음저감 연구

Study on Noise Reduction by Optimizations of In-line Duct Flow

한재오†, 이수영*, 모진용*, 이재권*

Jae-Oh Han†, Soo-Young Lee*, Jin-Yong Mo* and Jai-Kwon Lee*

Key Words : Axial Fan(축류팬), Centrifugal Fan(원심팬), Axial Fan with Centrifugal type(원심식 축류팬), Pitch Angle(피치각), Twist Angle(비틀림각)

ABSTRACT

This paper was a study about noise reduction through flow stabilization in duct using experimental method and numerical analysis at the same time. To determine the fan's type three kinds of fans(axial fan, centrifugal fan, and axial fan with centrifugal type) was examined to investigate the suitability for duct.

As a result, under the equal number of rotation 2000 RPM, performance of an axial fan with centrifugal type was the most superior by 55dBA at 4.3CMM among other fans. After this, analyzed the results of the numerical analysis to find out the optimum design of pitch angle such as 0°, 10°, 15° and 20°. The intensity of turbulence was low when pitch angle was 15° and air volume became peak by 5.08 CMM. It was observed that axis component of velocity increased gradually when pitch angle increased from 0° to 20°. Finally, designed the shapes of D/S(Down Stream) in duct that agreed inlet angle(δ) of stationary blades with pitch angle(β) of axial fan with centrifugal type and derived flow to duct medial, and changed the shape of motor-mount to reduce occurrence of unstable vortex in tip of impeller, and embodied noise reduction and improvement of air flow rate through flow stabilization.

기 호 설 명

- k : 난류에너지, m^2/s^2
- β : Pitch Angle(피치각), deg
- θ : Twist Angle(비틀림각), deg
- α : Setting Angle(설치각), deg
- D_H : 축류팬의 허브 직경, mm
- D_T : 축류팬의 전체 직경, mm
- β_1 : 원심팬의 입구각, deg
- β_2 : 원심팬의 출구각, deg
- L : 코드길이, mm
- δ : 고정익 입구각, deg

1. 서 론

팬이란 연속적으로 공기나 기체에 운동에너지를 전달 해주는 장치로써, 건물 및 공조설비 등을 비롯한 가전제품에 이르기까지 매우 폭넓게 사용되는 유체기계이다. 그중에 인 라인 덕트 팬(In-line duct fan)은 주로 건물의 천장, 지하 주차장 및 주방, 화장실 등의 급·배기용으로 사용되고 있는 보조 송풍기로 많이 사용되고 있으며, 대부분의 인 라인 덕트 팬은 크게 축류식과 원심식으로 구분되어 진다.

여기서 축류팬의 경우는 원심팬에 비해 설치공간을 작게 차지하며 고효율을 얻을 수 있으나, 원심팬에 비해 정압성능이 낮아 덕트의 길이나, 댐퍼 및 시스템의 변경에 따른 성능의 변화가 커서 안정적인 성능확보가 어려운 단점을 갖고 있다. 반면에 원심팬의 경우는 원심력을 이용함에 따라서 정압성능이 우수한 반면에 덕트 내부의 유동방향과 팬의 출구 유동방향이 일치하지 않기 때문에 효율이 낮고 설치 공간이 증가하는 경향이 있다. 또한, 정압성능을 올리

† 책임저자, 삼성전자(주) 생활가전총괄
E-mail : jo.han@samsung.com
Tel : (031) 200-6657, Fax : (031) 200-6416

* 삼성전자(주) 생활가전총괄

기 위해서 고속으로 회전함에 따라 팬의 원주속도가 증가함에 따라서 소음이 크게 증가하게 된다.

본 연구에서는 덕트 내 적용팬의 유량과 정압 성능을 향상시키고 유동방향 일치 및 팬 효율개선을 위하여 날개 형상을 변경하였고, 후류측에 정익을 설치하여 동익에 의해 발생한 선회 속도 성분이 정익을 통해 정압으로 회수될 수 있도록 하였으며, 이를 실험적 방법과 동시에 해석적 방법을 통하여 연구를 수행하였다.

또한, 본 연구에서는 300~400CMH의 풍량성능에 대하여 25.0~30.0mmAq의 시스템 저항을 갖는 덕트 내부유로의 최적화를 위해 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

본 연구의 덕트 내 유로최적화를 위해 Fig. 1과 같이 장치를 구성하였다. 우선 본 장치는 직경이 $\Phi 320$ 인 원형덕트로서 시스템 구성부, 팬모터 구동부 그리고 토출부 등 크게 3개부로 구성되어 있다. 시스템 구성부에는 시스템의 저항을 조절하는 댐퍼 및 필터 등으로 구성되며, 팬모터 구동부는 모터와 모터마운트 그리고 덕트 내 유동을 일으키는 회전익과 정압성능을 개선하기 위하여 설치되는 고정익으로 구성되어 있다. 물론 회전익의 전단에는 흡입유동에 의한 손실을 줄이기 위해 벨 마우스(Bell-mouth)가 설치되었다. 토출부에는 회전익 및 고정익에 의해서 회전 및 토출되는 유체의 소음을 최소화하기 위하여 소음기 등을 구성시켰다. 그러나 회전익 이외에 추가된 이러한 부속품들은 전부 적용팬의 토출풍량, 정압 상승량 및 도달거리 등의 성능을 변화시킬 뿐만 아니라 또한 팬 모터의 부하를 증가시키는 요인이 되어 최적설계의 대상이 된다.

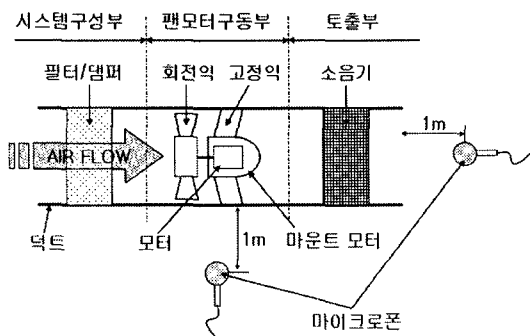


Fig. 1 Experimental apparatus

2.2 해석 방법

본 연구에서는 구성된 덕트의 해석연구를 위하여 범용 CFD 소프트웨어인 Scryu/Tetra Ver.5를 사용하였다. 이때 해석모델은 k-e 난류모델을 이용하여 Transient 해석을 수행하였으며, 격자수는 500만개로 각 case당 92시간씩의 해석시간이 소요되었다. 유한체적법을 이용한 연속방정식(1), 운동량방정식(2) 및 MP k-e 난류방정식(3.1, 3.2)은 아래와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \dots\dots\dots(3.1) + G_s + G_T - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_s + G_T) (1 + C_3 R_f) \dots\dots\dots(3.2) - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k}$$

2.3 형상 설계

(1) 팬 형상 설계

본 연구에서 우선적으로 덕트에 적용을 고려한 팬은, Table 1에 보이는 바와 같이 허브(hub)와 날개(blade)로 구성되어 있으며 허브 직경(D_H)은 165mm, 임펠러의 외경(D_T)은 260mm, 날개수는 11개로 구성된 축류팬으로 허브에서 팁까지 그 피치각(β)이 60°에서 45°까지 15°의 비틀림각(θ)을 갖는다. 두 번째로 적용을 검토한 팬은 우리가 일상에서 쉽게 접할 수 있는 원심팬으로 그 외경(D_O)은 240mm, 내경(D_I)은 150mm인 11개의 날개를 갖는 터보팬이다. 그 코드 길이(L)는 69mm이며, 날개의 입출구각인 β_1 과 β_2 는 각각 55°, 24°, 날개의 설치각(α)은 36.5°를 갖는 이 원심팬은 날개의 입구에서 바닥판까지의 날개의 형상이 같고, 피치각이 구성되지 않은 2차원적 형상을 갖고 있다. 마지막으로 검토한 원심식 축류팬은 그 2차원적 파라미터는 앞의 원심팬과 같은 형상을 하고 있으나, 그 축방향의 형상에 있어서 큰 차이가 있다. Fig. 3에 보이는 바와 같이 팬의 높이에 따른 각 단면 'A', 'B', 'C'별로 그 날개의 각도가 일정하게 변화하는 형상으로, 축방향의 유동을 유도하기 위하여 축류팬의 피치각을 갖는 특징이 있다. 본 연구는 이러한 팬 형상에 대한

검토를 위하여 우선 실험을 통하여 그 적용성을 검토하였다.

Table 1 Schematic diagrams of the impeller

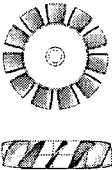
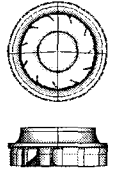
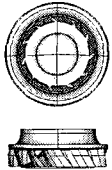
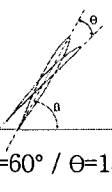
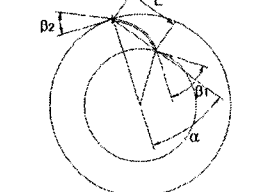
구분	축류팬	원심팬	원심식 축류팬
형상			
내·외경	Φ260 / Φ165	Φ240 / Φ150	Φ240 / Φ150
날개수	11엽	11엽	11엽
임펠러 제원	 $\beta=60^\circ / \theta=15^\circ$		

Fig. 2에는 팬 형상 선정에 대한 검토 결과를 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 우리가 일반적으로 사용하는 인 라인 덕트 팬인 축류팬을 적용하여 일정한 회전수(2000RPM)로 운전하게 될 경우, 그 정압성능이 작아 토출풍량은 약 3.0CMM, 그때의 소음레벨은 약 65dBA 수준으로 그 적용성에 매우 큰 문제가 있음을 알 수 있었으며, 이에 반하여 원심팬을 적용하여 동일한 2000RPM으로 운전한 경우에는 동일한 시스템 구성에 있어서 축류팬 적용시보다 약 25~30%의 토출풍량이 향상되어 약 3.8CMM이 확보되었고, 이때 소음측면에서도 60dBA 수준으로 소음이 크게 감소됨을 볼 수 있었다. 이에 본 연구에 의해 설계된 피치각(β)이 15°인 원심식 축류팬을 덕트에 적용한 경우는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 그 풍량 및 소음에 대한 성능이 크게 향상됨을 알 수 있다. 우선 토출풍량에 있어서는 동일한 회

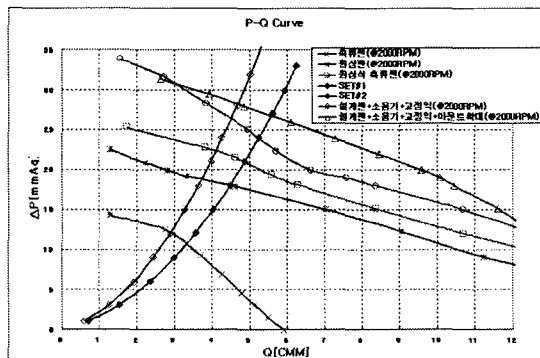


Fig. 2 Pressure difference according to air flow rate

전수의 축류팬에 비하여 그 정압성능이 크게 향상되어 약 30~40%의 토출풍량이 증가된 4.3CMM이며 이때 방사되는 소음값 또한 크게 개선되어 약 55dBA의 큰 감소효과를 나타내었다. 이는 원심식 축류팬의 축방향으로 유동을 유발하는 피치각의 구성에 의한 것으로 원심력에 의한 정압상승효과와 축류팬의 축방향 유동의 유도 효과가 동시에 적용되어 그 효과를 극대화 시킨 것으로 사료된다.

(2) 원심식 축류팬의 피치각(β) 설계

앞 절에서 나타난 바와 같이 덕트내 유동에 대하여 상대적으로 우수한 성능을 나타낸 원심식 축류팬의 최적화된 피치각을 선정하기 위하여, 우리는 수치적 해석 방법을 이용하여 그 토출풍량 및 난류강도 등을 비교 평가하였다. 우선 원심식 축류팬에 있어서 피치각(β)은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 축방향으로 임의의 높이인 단면 'A', 'B', 'C'에 대하여 그 임펠러의 2차원적 형상이 임의의 각도를 갖고 진행되었음을 의미한다. 이에 본 연구에서는 축류의 유동을 유발하기 위해 적용한 피치각(β)을 0°, 10°, 15°, 그리고 20°로 세분화하여 그 영향도 및 설계값을 선정하고자 하였다.

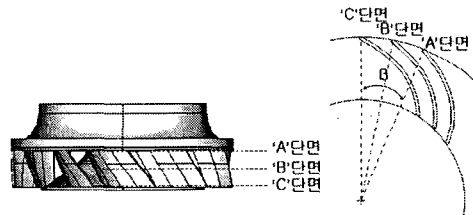


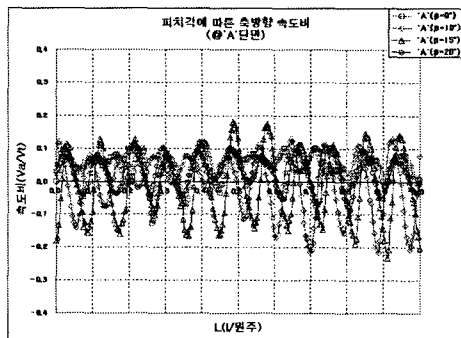
Fig. 3 Schematic diagrams of pitch angle of the impeller

피치각에 대한 수치해석 결과는 Table 2에 잘 나타나 있다. Table 2에는 각각 다른 피치각을 갖는 원심팬에 대하여 동일한 회전수 2000RPM에 대하여 해석을 통한 결과를 나타낸 것으로 피치각이 0°인 일반 원심팬의 경우는 토출풍량이 4.56CMM으로 가장 성능이 낮으며, 이때의 난류강도 $k=12$ 인 iso-surface를 살펴보면 leading edge를 지나 suction surface 내측에 나타남을 볼 수 있다. 그리고 피치각(β)이 10°와 20°를 갖는 팬에 있어서는 그 토출풍량은 4.95CMM과 5.01CMM으로 0°에 비해 향상되었음을 알 수 있었으며, 난류강도 또한 작아져서 k 가 12인 면은 찾을 수 없었고 k 가 8인 iso-surface가 팬 날개의 후류측에 넓게 분포해 있음을 알 수 있다. 피치각(β)이 15°의 피치각을 갖는 경우에 있어서는 그 토출풍량이 5.08CMM으로 가장 높았으며 또한 k 가 8인 iso-surface도 임펠러 후류에 상대적으로 약하게 나타남을 알 수 있어 해석 결과상 가장 좋은 성능을 나타내었다. 이로서 원심식 축류팬 피치각의 설계값은 15°로 선정되었다. 물론 15° 전후로 최적값이 존재 할 수는 있으나 그 값의 크기가 크지 않을 것으로 판단하여 그 이상의 해석은 진행하지 않았다.

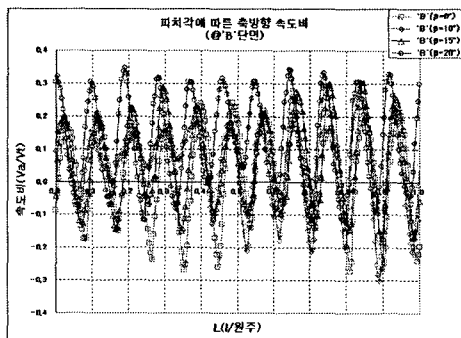
Table 2 Iso-surfaces of the turbulent energy

구분	원심팬 ($\beta=0^\circ$)	원심식 축류팬		
		$\beta=10^\circ$	$\beta=15^\circ$	$\beta=20^\circ$
해석 결과				
풍량 & k	Q=4.56CMM k=12 $\Delta P=15.1\text{mmAq}$	Q=4.95CMM k=8 $\Delta P=17.5\text{mmAq}$	Q=5.08CMM k=8 $\Delta P=18.3\text{mmAq}$	Q=5.01CMM k=8 $\Delta P=17.9\text{mmAq}$

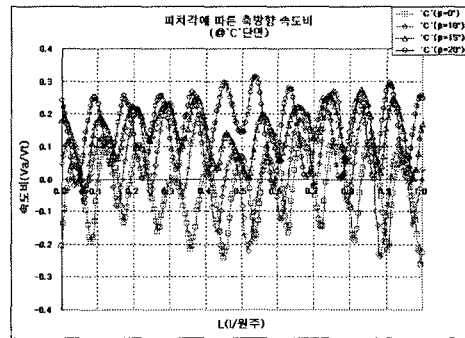
또한, Fig. 4에 나타낸 것은 Fig. 3에서 나눈 각 단면의 팬 출구측에서의 방향별 유속분포를 분석한 결과이다. 여기에는 각 피치각(β)이 0° , 10° , 15° , 그리고 20° 로 변환에 따라 각 단면에서의 팬의 출구 유속을 추출하여 축방향으로의 유속이 어떻게 변화하는지에 대한 검토 결과로서, 각 그래프의 가로축은 원주방향에 대한 거리비고 세로축은 각 위치에서의 축방향 속도를 반경과 원주 및 축방향 속도에 대한 전체유속으로 나눈 값으로 표현하였다. 이렇듯 Fig. 4의 (b), (c)에서 처럼 피치각이 0° 에서 20° 까지 증가함에 따라 축방향의 속도성분의 영향이 커짐을 알 수 있다.



(a) section 'A'



(b) section 'B'



(c) section 'C'

Fig. 4 Distributions of the axis component of velocity according to pitch angle(β)

(3) 후류 형상 설계

지금까지는 팬의 형상과 피치각에 따른 영향도를 평가하여 그 형상을 최적화하였다. 이제는 팬을 통과한 유체가 지나는 후류부에 대한 형상설계로서 크게 고정익의 유무 및 형상에 대한 개선효과와 모터마운트 형상에 의한 성능 개선 효과를 얻고, 그에 대한 원인을 분석하고자 한다.

우선, Fig. 5에서와 같이 고정익의 역할(동익에 의해 발생한 선회속도 성분을 정익에 의해 정압으로 회수)이 극대화 될 수 있도록 고정익의 입구각(δ)을 적용팬의 출구를 통하여 토출되는 각도, 즉 임펠러의 피치각(β)과 일치시켜 그 손실을 최소화 하였으며, 그 2차원적 형상에 있어서는 축방향으로 진행됨에 따라 그 반경방향의 형상이 내측으로 유동을 안내하도록 설계하여 모터마운트의 형상에 의한 체적 증가와 함께 토출된 유체의 속도에너지가 정압으로 자연스럽게 전환 될 수 있는 형상을 갖게 되었다. 이로 인해 Fig. 5에 보이는 바와 같이 고정익의 유무 및 형상에 대한 최적화를 통한 정압성능 향상으로 동일회전수에서 약 10% 이상의 토출풍량의 향상과 동일풍량 대역에서 각 위치별로 약 3.5~4.6dBA 정도의 소음저감 효과를 얻을 수 있었다.

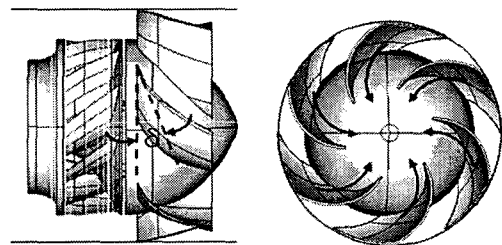


Fig. 5 Schematic diagrams of stationary blades

덕트 내부 형상에 있어서 보통 모터마운트 등 부가되는 물체의 형상에 대하여는 작으면 작을수록 그 물체가 받는 저항을 줄여 내부유동을 원활히 하는 것으로 생각하고 있다. 본 연구와 같은 팬의 후류에 모터마운트가 존재하게

되는 경우는 임펠러의 토출구를 통과한 유체가 날개 끝단을 떨어져 나와 원주방향의 회전과 함께 축방향으로 진행하게 된다. 이때 Fig. 6의 해석 결과에서 (a)에 보이는 바와 같이 그 크기가 작게 되면 토출된 유체가 압력이 낮은 곳으로 되돌아 오는 현상이 발생하게 되는데, 이렇게 발생된 3차원적 와에 의해 임펠러 끝단에서의 유로가 좁아지는 현상을 유발하게 되어 소음 및 유동저항을 증가시키는 결과를 초래하게 된다. 이에 대한 대책으로 와의 발생영역을 Fig. 6의 (b)와 같이 모터마운트 형상의 확대를 통하여 제거하게 되면, 임펠러의 토출측에서의 와의 발생 억제로 인한 토출저항의 감소 및 유동이 안정화되어 소음의 저감효과가 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8을 통하여 모터마운트의 형상에 대한 최적화로 동일풍량에서 약 7dBa의 소음저감효과를 얻을 수 있으며, 이는 1kHz를 기준으로 한 저주파에서 고주파에 이르기까지 전대역에 걸쳐 음압레벨이 고르게 감소하는 현상으로 소음저감은 물론 음질개선에 큰 효과를 나타냄을 알 수 있었다.

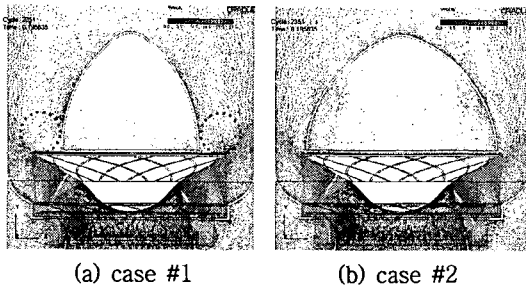


Fig. 6 Distributions of absolute velocity

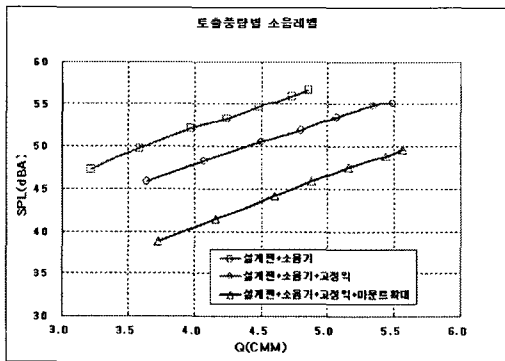
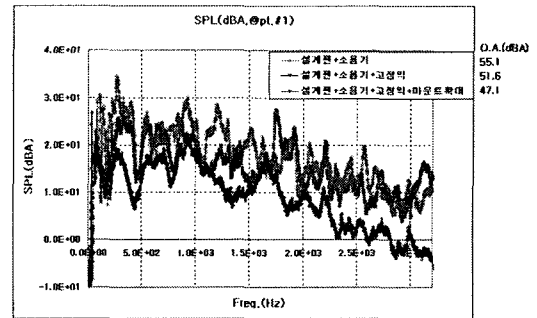


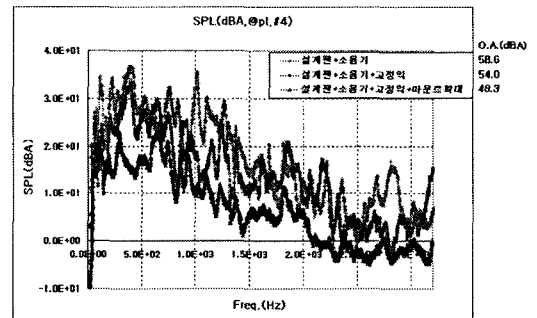
Fig. 7 Sound Pressure Level vs. air flow rate according to shape of the down stream

3. 결론

본 연구에서는 인 라인 덕트팬의 유량과 정압상승의 향상 및 소음을 저감하기 위한 방법으로 원심식 축류팬에 대한 연구와 그와 수반되는 구조물의 형상최적화를 통하여



(a) at point #1



(a) at point #4

Fig. 8 Spectra of SPL according to shape of the down stream

유동의 안정을 도모하였다. 이때 수치해석방법과 실험적 방법을 병행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 인 라인 덕트에 적용하는 팬의 선정에 있어서, 축류팬과 원심팬, 그리고 원심식 축류팬을 동일한 운전조건인 2000RPM에서 검토한 결과는 축류팬이 3.0CMM, 65dBa, 원심팬은 3.8CMM에 60dBa 수준이었으며, 원심식 축류팬의 경우는 4.3CMM의 토출풍량에 비하여 55dBa 수준으로 그 성능이 크게 향상되었다.

(2) 원심식 축류팬의 피치각을 0°, 10°, 15°, 그리고 20°로 변경하며 그 성능에의 영향도를 수치적 해석 방법을 통해 분석한 결과를 보면, 피치각(β)이 증가함에 따라 전체 유속에 대한 축방향으로의 속도성분이 증가함을 알 수 있었으며, 피치각을 구성함에 따라서 토출풍량의 향상과 난류강도가 낮아짐을 알 수 있었다. 이때, 본 연구에서는 10°, 15°, 그리고 20°의 피치각을 형성할 경우 그 토출풍량을 비교하면 각각 4.95CMM, 5.08CMM, 그리고 5.01CMM의 풍량성능을 나타내어 15°의 피치각을 구성한 경우가 가장 좋은 성능을 나타내었다.

(3) 팬 후류측의 고정익의 형상설계에 있어서, 고정익의 축방향 입구각(δ)을 임펠러의 피치각(β)과 일치시켜 구성하며, 동시에 반경방향으로 곡선을 이루어 유체가 진행됨에 따라 덕트 내측으로 유동을 안내하는 형상을 갖게 함으로서 정압상승 효과의 향상에 따른 10%의 풍량증가와 동일풍량에서 약 4.0dBa의 소음저감효과를 얻을 수 있었고,

마운트 모터의 형상에 대한 최적화를 통해 유동의 안정을 꾀하였으며 이에 따라 약 7dBA의 큰 소음저감 효과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 강석윤 등, 2005, “피치각 수정에 따른 축류식 터보팬 성능 변화에 관한 연구”, 설비공학회 논문집, 대한설비공학회, pp. 268 ~ 276.
- (2) 전완호 등, 1995, “진공청소기 원심팬의 유동과 소음 해석”, 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.130 ~ 135.
- (3) 류인근 등, 2003, “임펠러 형상 변경에 따른 축류식 터보팬의 내부 유동특성”, 동계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 363 ~ 368.
- (4) 안광원 등, 2002, “축류식 In-line Duct Fan의 유동장 특성에 관한 실험적 연구”, 기계관련 산학연 연합심포지엄, 대한기계학회, pp. 1990 ~ 1995.
- (5) 이승배 등, 1995, “최적화 알고리즘을 이용한 저소음 원심팬 형상 최적설계”, 추계학술대회 논문집(II), 대한기계학회, pp.521 ~ 526.