

부등피치를 적용한 재생 블로워의 소음특성 연구

이경용* · 정욱희** · 김진혁** · 김철호** · 최영석**† · 마재현*** · 정경호*** · 박운진****

Analysis of Noise Characteristic of Uneven Pitch Regenerative Blower

Kyoung-Yong Lee*, Uk-Hee Jung**, Jin-Hyuk Kim**, Cheol-Ho Kim**, Young-Seok Choi**†, Jae-Hyun Ma***, Kyung-Ho Jeong**, Woon-Jean Park****

Key Words : Noise Characteristic(소음특성), Performance(성능), Regenerative Blower(재생 블로워), Uneven Pitch(부등피치)

ABSTRACT

The flow and noise characteristics of the regenerative blower are evaluated experimentally. To decrease the noise of regenerative blower at a high frequency, we arrange the impeller vanes unevenly by special formula. The uneven pitch formular consists of the combination of trigonometric function. The magnitude of degree between each vanes and the control parameters of trigonometric functions are main design parameters for the uneven pitch. The flow characteristics of even and uneven impellers are tested by the fan tester and compared each results. The efficiency of a blower is calculated by the axial power using a dynamo system. The noise property of designed impeller is measured in an anechoic room. In this study, we certify that the uneven pitch impeller is effective in the noise reduction at a high frequency.

1. 서 론

재생 블로워(regenerative blower)는 공기를 작동유체로 사용하는 재생형 유체기계이며 산업계에서는 링블로워(ring blower)라는 명칭으로 알려져 있다. 재생 블로워는 성능특성상 용적식(positive displacement type) 및 원심식(centrifugal type)의 중간에 해당되며 산업용으로는 폐수처리장의 기폭기 및 자동차 공정의 진공펌프 등으로 널리 사용되고 있다. 최근 가정 또는 소형 건물용 연료전지 발전 시스템의 스택(stack)에 공기를 공급하는 용도로 적용범위가 확장되면서 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다.

재생 블로워와 관련된 연구는 주로 적용 대상 시스템에서 요구하는 조건(유량 및 압력)을 만족하는 설계를 위한 연구가 진행되어 왔으며 추가로 고효율을 위한 최적화 설계 및 성능예측기법을 개발하는 연구가 주를 이루어 왔다.⁽¹⁾ 이는 다수의 날개를 갖는 재생 블로워의 마찰 및 기타 난류에 의

한 손실 발생으로 원심식에 비해 효율이 낮은 문제점을 개선하려는 노력으로 볼 수 있다. 이와 함께 적용처가 일반 산업체에서 가정용으로 확장되며 성능과 함께 저소음에 대한 연구가 진행되고 있는 실정이다.⁽²⁾

재생 블로워의 소음은 선행 연구로부터 발생원 및 소음의 구성 등이 알려져 있으며 이를 저감하기 위한 연구가 최근에 수행되고 있다.⁽³⁾ 주로 형상 변수를 조정하여 내부 유동장을 개선하고 이로부터 소음 저감의 효과를 기대하거나 소음기(silencer)를 추가로 장착하여 특정 주파수대(frequency band)의 소음을 제어하는 방식을 사용한다. 재생 블로워의 내부 유동장을 개선하여 소음을 저감하는 방식은 블로워 전체 성능과 밀접한 영향이 있으므로 공력학적 성능을 유지하면서 소음을 저감하는 것에 한계가 발생할 수 있다. 또한 소음기를 추가하는 것은 원가 상승 및 소음기로 인한 유동손실이 발생하여 전체적인 효율 감소가 불가피하다.

본 연구는 재생 블로워의 이산주파수 소음(discrete frequency

* 한국생산기술연구원/한국기술교육대 대학원(Korea Institute of Industrial Technology/Koreatech Graduate School)

** 한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)

*** (주)황해전기(Hwanghae electric Co.,Ltd.)

**** 한국기술교육대학교 기계공학부(Koreatech School of Mechanical Engineering)

† 교신저자, E-mail : yschoi@kitech.re.kr

noise)의 저감을 위해 임펠러(impeller)의 날개(vane)를 부등피치(uneven pitch)로 배열하고 그 효과를 분석하였다. 날개의 부등피치 배열을 위해 부등피치 생성함수를 사용하였으며 결정된 임펠러 형상을 시제품으로 제작하여 실험을 통해 공력 및 소음 성능을 측정하고 등피치 임펠러의 특성과 비교하여 그 효과를 확인하였다.

2. 형상설계 및 실험방법

2.1 부등피치 생성

다수의 날개를 갖는 유체기계의 소음 저감을 위해 부등피치를 적용하는 것은 일반적으로 알려진 방식이다.⁽⁴⁾ 부등피치로 배열하는 과정에서 날개를 특정한 주기로 배열하게 되면 또 다른 소음이 발생하거나 소음이 증폭되는 문제(공진)가 발생하기 때문에 주로 난수 발생기(random number generator)를 사용한다. 날개의 위치를 난수로 배열하게 되면 결정된 형상에 대한 설계 근거가 부족하여 이에 대한 효과는 반드시 성능분석을 통해 확인을 해야 한다. 또한 난수 배열을 인위적으로 조정할 수 없기 때문에 최적의 배열을 도출하기 위해서는 많은 시행착오가 발생한다.

본 연구는 부등피치 배열을 제어하여 추후 최적화 알고리즘을 적용하기 위하여 선행 연구 및 특허를 통해 알려진 부등피치 생성함수^(5, 6)를 사용하였다.

$$\Delta\theta_i = \frac{360}{N} + (-1)^i \times A_m \times \sin\left(P_1 \frac{360}{N} i\right) \times \cos\left(P_2 \frac{360}{N} i\right) \quad (1)$$

식(1)의 $\Delta\theta$ 는 날개 사이 각(degree), i 는 날개 순번, N 은 날개 개수이며 A_m , P_1 및 P_2 는 부등피치의 크기와 배열을 조정하는 변수이다.

본 연구의 설계 대상 블로워의 날개 개수는 총 39개이며 이를 적용하여 부등피치의 영향을 검토하기 위해 설계한 부등피치 배열 정보를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1 좌측 그래프의 x축은 날개의 순번이며 y축은 각 날개의 사이각을 의미하고 이러한 배열을 각도로 표현한 것이 Fig. 1의 우측 형상이다. 설계자가 식 (1)의 변수를 변화시키며 동시에 예상되는 날개 배열을 확인 할 수 있도록 설계방법을 고안하였고 육안으로 보기에 날개 쓸림현상이나 날개 사이의 각도차가 크게 발생하지 않도록 설계하였다. 설계된 결과를 보면 8도부터 10.4도 사이에 특정한 규칙 없이 배열된 것을 볼 수 있다. 이러한 설계안을 반영한 부등피치 임펠러를 3차원 모델로 설계하였다(Fig. 2).

2.2 실험방법

본 연구는 부등피치의 효과를 분석하기 위해 시제품을 제

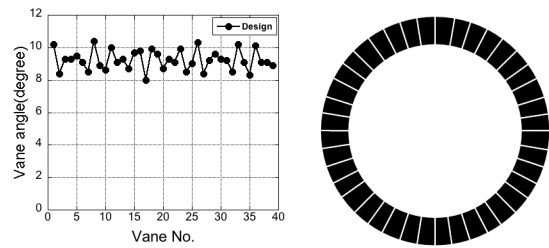


Fig. 1 Distribution of uneven pitch

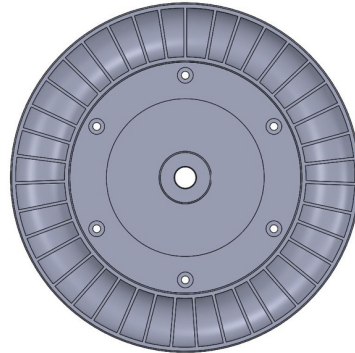


Fig. 2 3D modeling of uneven pitch impeller

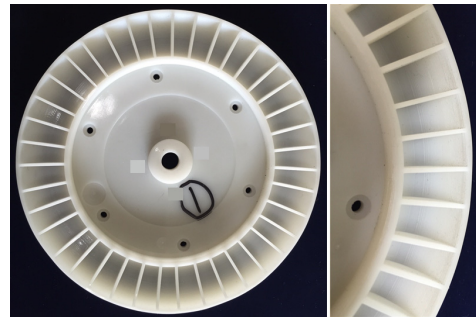


Fig. 3 Prototype of uneven pitch impeller by 3D printer

작하여 성능을 평가하는 방법을 선택하였다. 최근 수치해석적인 방법으로 성능 및 소음을 예측하는 연구가 많이 진행되고 있으나 추후 부등피치 생성 변수의 최적화 설계 과정에서 도출되는 여러 설계안에 대해 실험적인 평가가 더 효과적일 것으로 판단하여 결정하였다.

부등피치로 설계된 임펠러는 최근 형상을 제작하는 방식에 있어 혁신적으로 시도되고 있는 3D 프린터 방식을 적용하였다. Fig. 3에 3D 프린터로 제작된 임펠러를 나타내었다. 기존 등피치 모델과 동일한 방식으로 비교하기 위해 등피치 임펠러도 3D 프린터로 제작하였고 제작 시간 및 비용 절감을 위해 임펠러의 축방향 두께를 얇게 제작하고 동일한 외경을 갖는 알루미늄 원형 판에 볼트로 고정하는 방식을 사용하였다. 이러한 방식은 등피치 모델뿐만 아니라 다양한 부등피치 형상에 대한 성능을 측정하기에 편리하며 축방향 변형을 방지하는 효과도 기대할 수 있다.

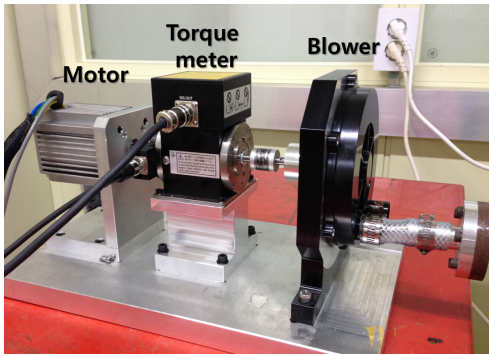


Fig. 4 Dynamometer of regenerative blower



Fig. 5 Noise test in anechoic room

일반적으로 재생 블로워의 경우, 유량이 적은 단점이 있어 디스크형 임펠러의 양쪽 면에 유로가 형성되어 있다. 이는 블로워를 병렬로 연결하여 유량을 증가시키는 원리와 동일하다. 그러나 본 연구는 부등피치에 의한 영향을 분석하기 위하여 임펠러의 한쪽 면만 유로를 형성하였다. 재생 블로워의 유로가 대칭이 아닌 경우에 임펠러의 반경이 큰 부분에 위치한 유로의 압력 비대칭으로 인하여 축방향으로 변형이 발생할 가능성이 있다. 임펠러 뒷면에 알루미늄 보강판을 적용하는 것은 변형을 방지하는 효과도 기대할 수 있다.

부등피치로 임펠러를 설계하는데 있어 가장 중점적으로 고려해야 할 사항은 질량 불균형(mass unbalance)이다. 등피치의 경우 정밀한 가공으로 질량의 불균형을 최소화 할 수 있으나 부등피치 배열은 가공의 정밀도와 관계없이 특정 두께를 갖는 날개가 부등하게 배치되기 때문에 질량 불균형이 자동으로 발생한다. 이를 위해 3D 프린터로 제작된 시제품의 질량 불균형 양을 측정하고 질량을 수정하여 등피치와 유사한 수준으로 질량 불균형을 결정하였다.

Fig. 4는 실험을 위해 제작된 토크측정장치(dynamometer)의 실제 사진이다. 블로워 구동을 위한 모터가 있고 블로워와 모터 사이에는 토크를 측정하기 위한 토크미터가 연결된다. 토크미터를 사용함으로써 블로워의 단독 효율을 측정할 수 있고 부하조건 변화에 따른 모터 성능변화도 무시할 수 있다. 이 장치를 사용하여 블로워를 구동시키고 생기원에서 보유하고 있는 송풍기 성능시험장치에 블로워 토출부를 연결하여 재생 블로워의 유동성능을 측정하였다. 또한 소음 특성을 확인하기 위해 토크측정장비를 생기원의 전무향실(anechoic room) 내부에 설치하고 소음을 측정하였다(Fig. 5). 전무향실의 암소음은 약 14 dBA 수준이며 실험을 위하여 마이크로폰의 정상작동 여부를 확인하였다. 재생 블로워의 소음실험에 대한 일반적인 규정이 없는 상황이며 본 연구에서는 측정하는 위치에서의 유체 토출에 의해 발생하는 소음을 배제하기 위해 입/출구 기준으로 45도 기울기에서 1 m 떨어진 지점을 측정점으로 결정하였다.

유동성능은 일반적인 송풍기 성능시험과 동일하게 모터

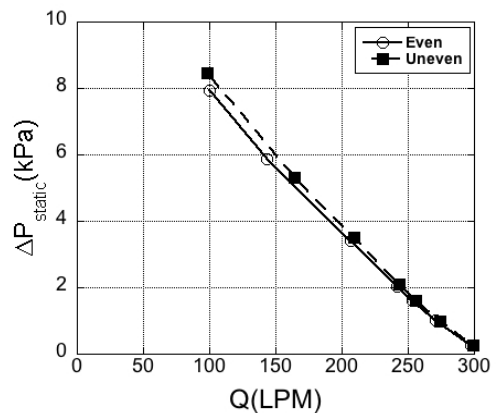


Fig. 6 Performance result (static pressure)

입력전압이 일정한 조건(19 V)에서 보조 송풍기와 밸브를 조절하며 유량변화에 따른 압력변화 및 토크량을 측정하였다. 소음특성은 유동실험과 동일한 모터 입력전압 조건에서 최대 유량을 기준으로 소음을 계측하였다. 재생 블로워가 시스템에 적용되는 상황을 고려해 보면 소음 실험과 같이 입/출구가 대기중으로 열려있지 않고 특정 부품이나 배관에 연결되는 방식이어서 최대 유량 조건이 아닌 특정한 작동 유량 조건에서 작동하나 소음실 여건을 고려하여 최대 유량에서 측정하였다.

3. 결과분석

3.1 유동성능

송풍기 성능시험장치를 사용하여 측정된 성능을 Fig. 6 및 7에 나타내었다. 임펠러의 날개 사이각이 일정한 모델을 “Even”, 부등피치 배열로 제작한 시제품을 “Uneven”으로 표기하였다. 유동 성능을 측정하는데 있어 모터를 특정 입력전압으로 고정하고 실험을 수행하였는데 이 과정에서 모터 특성으로 인하여 회전수 변화가 발생하였다. 두 경우 모두 유량이 감소함에 따라 회전수도 감소하였으며 그 양은 약 350

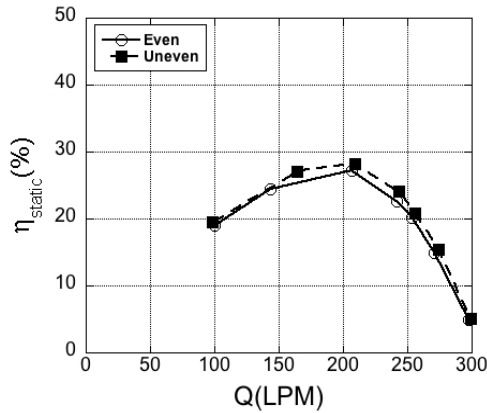


Fig. 7 Performance result (static efficiency)

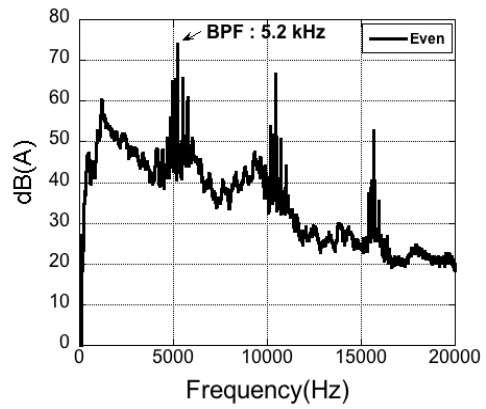


Fig. 8 Noise spectrum of even pitch

rpm이다. 유체기계의 결과를 비교하는데 있어 회전수가 변화하면 동일한 조건으로 볼 수 없기 때문에 평균 회전수인 8,000 rpm으로 상사하여 Fig. 6에 비교하였다.

일반적인 등피치와 부등피치의 성능비교 결과를 보면 부등피치의 성능이 상대적으로 감소한다고 알려져 있다.⁽⁶⁾ 이는 날개가 특정 위치에 몰려있거나 날개 사이각의 차이가 큰 경우 상대적으로 날개 사이의 유로가 좁은 경우에 유체가 유입되지 않는 유동 봉쇄 현상이 발생할 수 있기 때문이다. 그러나 본 연구의 경우 부등피치의 결과가 등피치 대비 감소하지 않고 조금 향상된 경향을 보이고 있다. Fig. 7의 효율 비교에서도 유사한 경향으로 효율이 상승하였다. 이에 대한 정확한 분석을 위해서는 부등피치 생성식을 사용한 다양한 부등피치 배열에 대한 결과를 함께 비교하여 부등피치 생성식 변수(A_m , P_1 및 P_2)의 변화에 따른 성능변화 동향을 분석하는 과정이 필요하다. 그에 앞서 Fig. 2 및 3의 부등피치 형상에서도 등피치와 큰 차이가 없어 설정한 부등피치 생성 방법에서는 유동성능의 차이가 없다고 판단되나 확실한 근거를 확보하기 위해서는 추가 연구가 필수적이다.

3.2 소음특성

소음 특성은 앞서 언급한 바와 같이 재생 블로워의 입출구가 소음실 내부에 열려 있는 상태로 최대 유량 조건에서 측정되었다. 등피치 및 부등피치 모델은 최대 유량 조건에서 약 26 rpm, 1 LPM의 회전수 및 유량 차이를 보여 거의 유사한 유량 및 회전수 조건에서 소음실험이 진행되었다고 판단된다.

Fig. 8은 등피치 임펠러의 소음측정 결과를 주파수별로 분석한 결과이다. 가장 돋보이는 특성은 5 kHz 근처에서 발생하는 소음의 피크(peak) 현상이다. 다수의 날개가 있고 날개를 통과하여 입구에서 출구로 이송되는 유체의 입출구 단속을 위해 유동면적이 변화하는 구조물(stripper)이 있는 경우 회전수 및 임펠러의 날개 개수로 정의되는 깃 통과 주파수(BPF, blade passing frequency)가 존재한다. 깃 통과 주

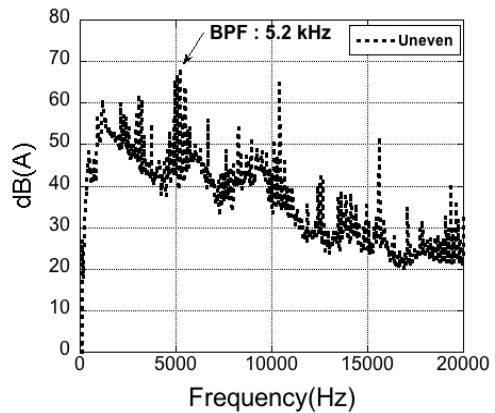


Fig. 9 Noise spectrum of uneven pitch

파수는 재생 블로워뿐만 아니라 자동차 블로워, 에어컨 블로워 및 기타 공조용 블로워와 같이 벌류트(volute) 형상의 케이싱을 갖는 경우도 확인 할 수 있다. 본 연구의 대상 블로워는 5.2 kHz에서 깃 통과 주파수가 존재하며 이 주파수의 배수에서 조화(harmonic) 현상으로 인한 피크가 주기적으로 발생하고 있다.

깃 통과 주파수는 블로워의 형식에 따라 형성되는 주파수 대역이 달라진다. 재생 블로워는 동일 성능을 기준으로 원심형에 비해 회전수는 낮지만 날개 개수가 많아 주로 고주파 영역에서 깃 통과 주파수가 형성된다. 이러한 소음 특성으로 인하여 링블로워를 포함한 재생 블로워는 고주파 소음 저감을 위해 맞춤형 소음기를 적용하고 있는 실정이다.

부등피치를 적용한 재생 블로워의 소음 특성을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8의 등피치 결과와 비교해보면 5.2 kHz에 형성되는 깃 통과 주파수의 소음값이 감소된 것을 확인 할 수 있다. 또한 전반적으로 다른 소음 피크가 발생된 것도 볼 수 있다. 이는 날개의 배열을 불규칙적으로 배열하여 발생된 현상이라고 판단된다. 깃 통과 주파수 사이에 작은 피크들이 추가로 발생한 것과 깃 통과 주파수의 소음값이 감소한 것 이외에는 등피치와 동일한 주파수에서 깃 통과 주파수가 형

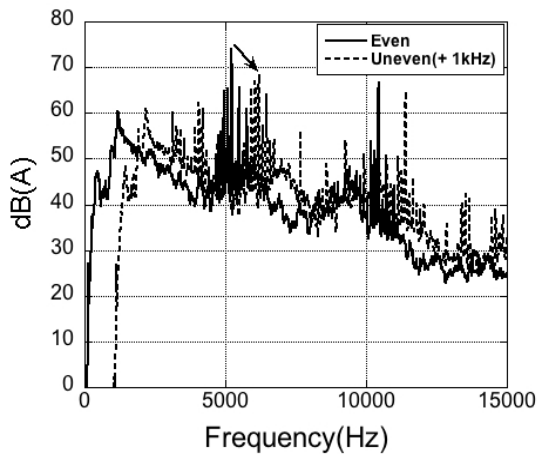


Fig. 10 Comparison of noise spectrum between even and uneven pitch

Table 1 Noise result

	Noise [dB(A)]	
	broadband	BPF(5.2 kHz)
Even pitch	79.0	74.1
Uneven pitch	78.3	68.6

성되고 주기성을 갖는 등 동일한 경향을 보인다.

등피치와 부등피치의 소음측정 결과를 비교하기 위해 부등피치 결과의 주파수에 1 kHz를 증가시켜 같은 그래프상에 비교해 보았다(Fig. 10). 부등피치의 깃 통과 주파수의 소음값이 현저히 감소된 것을 확인할 수 있으며 깃 통과 주파수보다 작은 주파수 영역에서 부등피치 모델의 경우 등피치에서 없었던 피크가 추가로 발생한 것을 확인 할 수 있다.

재생 블로워를 대상으로 부등피치를 적용한 결과를 종합해 보면 Table 1과 같다. 부등피치를 적용하여 전반적인 소음값(광대역 소음)이 감소하는 효과도 있었으나 그보다 고주파 소음이 5.5 dB(A) 정도 감소하는 효과를 얻었다. 실제 실험 과정에서 녹음된 소리를 비교해 보면 부등피치 모델의 실험에서 고주파 소음이 많이 감소한 것을 직접 느낄 수 있을 정도이다. 앞서 유동 성능에 대한 평가를 통해 부등피치를 적용하여 성능이 약간 상승한 것을 확인 할 수 있었으며 소음 측정 결과로 부터 전체 소음은 약 0.7 dB(A), 깃 통과 주파수의 소음은 약 5.5 dB(A) 감소하여 부등피치 적용에 대한 소음 저감 효과를 검증하였다.

4. 결론

본 연구는 재생 블로워를 대상으로 소음 저감을 위하여 임펠러의 날개를 부등피치로 배열하고 그 효과를 확인하기 위해 유동 및 소음 특성을 측정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구는 기존 부등피치 생성함수를 사용하여 재생 블로워의 임펠러 날개를 부등피치로 설계가 가능하다는 것을 제시하였고 시제품을 제작하여 유동 및 소음을 평가하는 방식을 제안하였다.
- 2) 부등피치를 적용한 재생 블로워의 유동특성은 기존 등피치보다 조금 향상 되었으나 다양한 부등피치 형상에 대한 추가 연구를 통해 근거를 확보할 필요가 있다.
- 3) 본 연구에서 설계한 부등피치 모델은 등피치 대비 전체 소음은 약 0.7 dB(A), 깃 통과 주파수에서 약 5.5 dB(A) 감소하여 부등피치로 인한 소음 감소 효과가 있다.

References

- (1) Badami, M. and Mura, M., 2012, "Leakage effects on the performance characteristics of a regenerative blower for the hydrogen recirculation of a PEM fuel cell", Energy Conversion and Management, Vol. 55, pp. 20~25.
- (2) Lee, C., Kil, H. G., Kim, G. C., Kim, J. G., Ma, J. H., and Chung, K. H., 2013, "Aero-acoustic Performance Analysis Method of Regenerative Blower," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 16, No. 2, pp. 15~20.
- (3) Kim, J. K., Lee, K. Y., Lee, C., Kil, H. G., Chung, K. H., and Hwang, S. M., 2014, "Development of a Low-noise Regenerative Blower for Fuel Cell Application", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 17, No. 2, pp. 48~53.
- (4) Moon, Y. J., Cho, Y., and Nam, H. S., 2003, "Computation of unsteady viscous flow and aeroacoustic noise of cross flow fans", Computers & Fluids, Vol. 32, No. 7, pp. 995~1015.
- (5) Patent : Apparatus for fluid Inhalation and exhaust (10-2007-0102058).
- (6) Jung, U. H., Choi, Y. S., Kwon, O. M., and Lee, K. Y., 2007, "Numerical Analysis of the Performance Influence of Uneven Blade Spacing in Multiblade Turbomachinery", Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp. 109~114.