

생활폐기물 관로이송용 터보블로어 운전 및 설계 최적화 연구

장춘만*†

Optimal design and operation of a turbo blower used for refuse collection system

Choon-Man Jang*†

Key Words : Turbo Blower(터보 블로어), Refuse Collection System(생활폐기물 관로이송 설비), Optimal Design(최적설계), Efficiency(효율)

ABSTRACT

Optimal operation of turbo blowers connected in serial is analyzed by experimental measurements and numerical simulation with three-dimensional Navier-Stokes equations. The turbo blower system considered in the present study is widely used for the refuse collection system. Design optimization of the turbo blower using some design variables is also studied to enhance the performance of the blower. Throughout numerical simulation, it is found that the input energy reduction by optimal operation of the turbo blowers with the proper changes of the rotor's rotating frequency can be reduced a input energy for operating the blower system compared to the conventional on-off operation method theoretically. It is also found that the optimal design method is effective to enhance the performance of the turbo blower.

1. 서론

생활폐기물 관로이송 설비는 최근 들어 주거환경의 개선의 일환으로써 신도시를 중심으로 국내에서도 보급이 확대되고 있다. 본 시스템은 쓰레기 투입구, 공기흡입구, 이송관, 중앙 집하장, 분리기 및 터보블로어 등으로 구성되어 있다. 터보블로어는 중앙집하장 내에 설치되며, 쓰레기를 이송관을 통해 쓰레기 투입구로부터 집하장까지 이송시키는 동력원이다. 터보블로어의 전력소비량은 시스템 전체 소비 에너지의 90퍼센트 이상을 차지하며, 시스템의 운전에너지 절감을 위해서는 터보블로어의 고성능 설계 및 최적운전기술 개발이 필요하다.

생활폐기물 관로이송 설비의 중앙집하장에 설치되는 터보블로어는 쓰레기 투입구와 집하장 사이의 거리에 따라 다양한 압력이 요구되며, 이러한 압력조건에 대응하기 위하여 복수의 터보블로어를 직렬로 연결하여 운전한다.⁽¹⁾ 직렬 운전을 통하여 블로어의 유량은 일정하게 유지시키면서, 압력은

블로어의 구동대수에 비례하여 증가시킬 수 있다는 장점을 갖는다. 터보블로어의 기존 운전방법은 직렬로 연결된 블로어를 개별적으로 필요한 압력에 상응하게 필요 대수만을 가동하는 방법을 사용한다. 생활폐기물 관로이송 설비용으로 사용되는 터보블로어는 통상적으로 소요동력이 대당 120-180 kW이며, 블로어 임펠러의 직경은 800-1,200 mm 정도이다. 유량은 이송관을 통해 쓰레기를 원만하게 이송시킬 수 있는 유속 범위인 25-30 m/s를 유지할 수 있도록 한다.

터보블로어의 고효율 설계를 위하여, 그동안 2차원 자오면 설계방법을 비롯하여, 준3차원 설계 및 최적설계 방법들이 연구되어 왔다.⁽²⁻⁴⁾

본 논문에서는 생활폐기물 관로이송용으로 사용되어지고 있는 터보블로어의 고효율화 연구 방향 및 운전에너지 최적화 기술에 대하여 고찰 하였다.

2. 다단 직렬 운전 터보블로어

생활폐기물 관로이송 설비용 터보블로어는 쓰레기 투입구와 집하장까지의 거리에 따라 다양한 압력에 대응하여 운전되어야 하기에 복수의 블로어를 직렬로 연결하여 운전한다.

* 한국건설기술연구원 설비플랜트연구실
† 교신저자, E-mail : jangcm@kict.re.kr

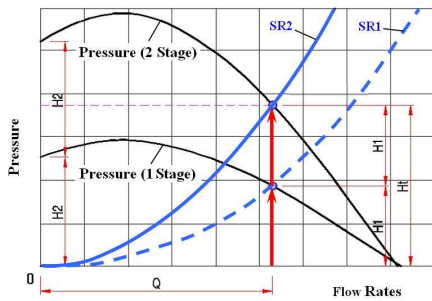


Fig. 1 Performance characteristics for serially connected turbo blowers

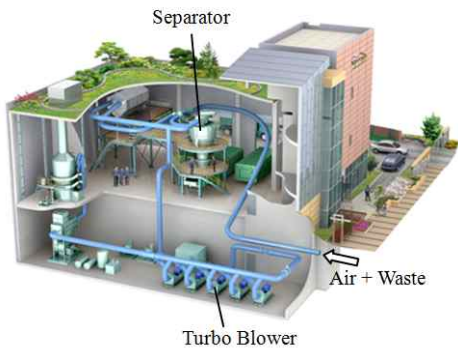


Fig. 2 Layout for multi-stage turbo blower system used for refuse collection system

Fig. 1에 직렬운전에 따른 성능특성을 나타낸다. 터보블로어를 직렬로 설치하면, 동일한 풍량에 대하여 송풍기 대수에 비례하여 압력이 배수로 증가하는 특성을 나타낸다. Fig. 1의 2단 직렬 연동형 터보블로어의 성능곡선에서, 일정유량(Q)에서 2단 직렬설치에 따라 압력이 2배(H_1+H_1)로 상승하게 된다.

Fig. 2는 생활폐기물 관로이송 설비의 중앙집하장을 나타낸다. 공기와 쓰레기가 혼합된 상태로 배관을 통해 집하장으로 들어오면, 먼저 분리기에서 쓰레기를 공기와 분리한다. 분리된 공기는 복수로 직렬 설치된 터보블로어를 지난 후에 일련의 공정을 거쳐 대기로 방출된다. 터보블로어는 생활폐기물 관로이송 설비의 운전에너지의 90퍼센트 이상을 소비하는 중요 에너지 소비원이다.

3. 실험 및 수치해석에 의한 터보블로어 성능 평가

3.1 실험에 의한 성능평가

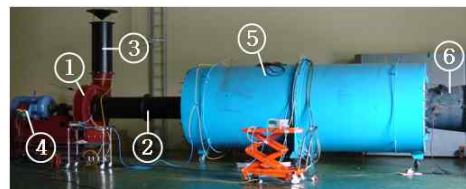
터보블로어의 성능평가를 위한 실험장치는 덕트형 및 챔버형으로 대별할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 3의 챔버형 성능평가 장치로 단품 성능을 평가하였다.

챔버형 성능평가 실험장치는 AMCA210⁽⁵⁾의 규격을 따라서 설계하였으며, 흡입챔버는 실험용 터보블로어 상류에 설치하였다. 즉 입구가이드를 통하여 유입된 공기는 흡입챔버에서 노즐에 의한 유량측정 및 블로어 상류측 압력을 측정한다. 흡입챔버의 직경은 1,800mm이며, 흡입챔버 및 터보블로어 사이의 연결관은 직경 500mm인 원형관을 사용하였다. 터보블로어의 효율 측정을 위하여 모터의 입력전압 및 전류를 측정하였다.

3.2 터보블로어 수치평가

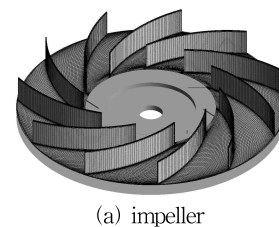
터보블로어의 성능 예측 및 수치최적화를 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 블로어 임펠러 격자를 Fig. 4에 나타낸다. 임펠러부의 격자는 Turbo-grid를 이용하여 정렬 격자로 구성하였으며, 케이싱은 비정렬 격자로 하였다. 입구와 출구덕트는 ICEM CFD를 이용한 정렬격자로 구성하여 계산 부하를 줄였다.

수치해석은 상용 소프트웨어인 Ansys CFX 12를 사용하였다.⁽⁶⁾ 난류모델은 유동의 박리현상 해석에 적합한 전단응력이송 (Shear stress transport) 모델을 사용하였다. 계산영역은 고정영역인 볼류트 케이싱 부분과 회전영역인 임펠러 디스크 두 개의 영역으로 설정하였으며, 각 영역간의 경계

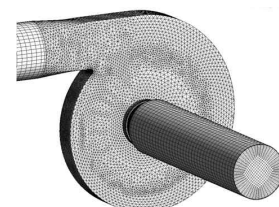


1: blower, 2: inlet connecting duct, 3: outlet connecting duct, 4: driving motor, 5: chamber, 6: inlet guide

Fig. 3 Chamber typed blower tester



(a) impeller



(b) casing and duct

Fig. 4 Computational grid system

계산은 프로즌 로터(Frozen-Rotor)방법을 적용하여 계산을 수행하였다.

4. 터보블로어 운전에너지 최적화

4.1 단순 터보블로어 On-Off 운전방법

Fig. 5는 4대의 터보블로어가 직렬 연결된 구성도를 나타낸다. 터보블로어의 가동대수는 필요압력에 따라 결정되며, 메인 덕트에 설치된 차단밸브를 이용하여 운전대수에 따른 기류방향을 조절한다. 터보블로어의 필요한 압력(부압)은 쓰레기 투입구와 집하장 사이의 파이프 길이의 증가에 따라 증가한다.

Fig. 6에서 나타낸 것과 같이 쓰레기 이송파이프의 길이에 따라 요구압력이 증가하며, 이에 상응하는 대수만큼의 블로어를 가동한다. 기존의 시스템 운전방식에서는 블로어를 일정요구 압력에 따라 단순히 On-Off운전을 실시하였다. 이로 인하여 운전대수에 따라 계단형의 압력특성을 갖으며, 요구압력과 실제 터보블로어의 발생압력의 차(그림에서 빗금 부분) 만큼의 미사용 압력손실 영역이 발생한다.

4.2 터보블로어 모터의 가변운전

생활폐기물 관로이송 설비에서는 통상 500mm직경을 갖는 이송관을 많이 사용하며, 쓰레기를 이송관 내로 원활히 이송시킬 수 있는 유속을 유지하도록 설계한다. 즉 덕트 내 기류속도는 25-30m/s를 유지하도록 설계하며, 이보다 속도가 낮거나 높으면 쓰레기의 관내 정체나 과도한 에너지 손실을 발생시킨다. 기존의 단순 On-Off 운전에 의한 블로어 가

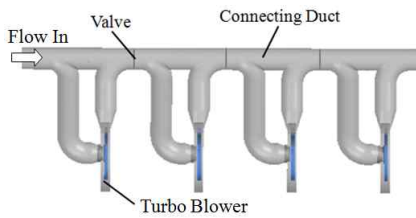


Fig. 5 Layout for turbo blowers serially connected

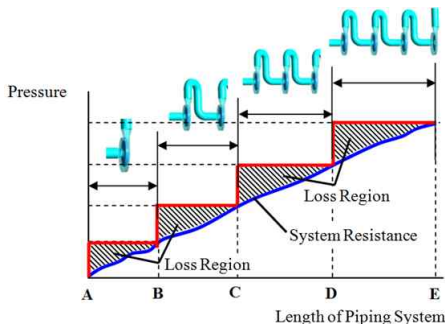


Fig. 6 Pressure loss due to on-off operation of turbo blowers connected in serial

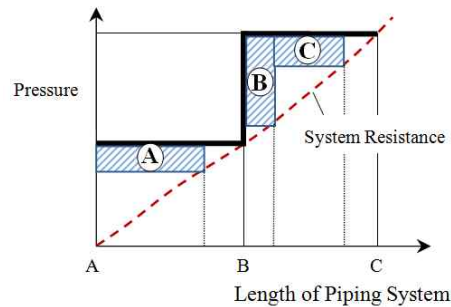


Fig. 7 Optimal operation of two turbo blowers connected in serial

동으로 발생하는 압력손실 영역을 줄일 수 있는 방법 중에 하나는 인버터제어에 의한 터보블로어 모터제어 방식이다. 즉 관 내부의 필요 기류속도를 유지하면서 모터의 회전수를 조정하여 압력손실을 최소화 할 수 있다.

Fig. 7에서와 같이 블로어 1대를 운전하는 구간에서는 일정구간 모터의 회전수를 낮추어 유속을 25m/s까지 유지시켜 이로인한 운전에너지를 저감하면서도 기류속도를 일정이상으로 유지할 수 있다. 블로어를 2대 운전하는 구간에서는 상대적으로 낮은 압력이 요구되는 구간에서는 1대만을 가동하되, 모터의 회전수를 높이고, 상대적으로 압력이 높은 구간에서는 2대의 블로어의 모터 회전수를 일정 양만큼 낮추어 운전에너지를 감소하는 인버터 제어 방법을 고려할 수 있다.⁽⁷⁾ 이러한 모터 회전수의 최적제어를 통하여 터보블로어 시스템의 운전에너지를 10퍼센트 이상 줄일 수 있다.

5. 터보블로어 설계 최적화

5.1 최적설계법을 이용한 최적화 연구

터보블로어의 효율 및 압력특성 개선을 위하여, 기본설계 형상을 기반으로 목적화하고자하는 변수에 대한 최적설계방법에 유체기계설계에 많이 적용되고 있다.

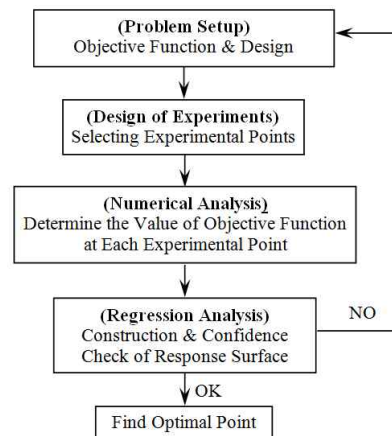


Fig. 8 Optimization procedure using response surface method

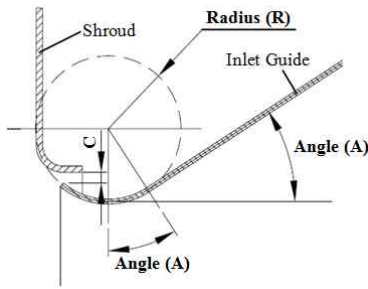


Fig. 9 Definition of design variables

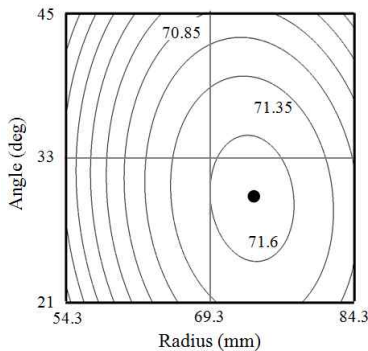
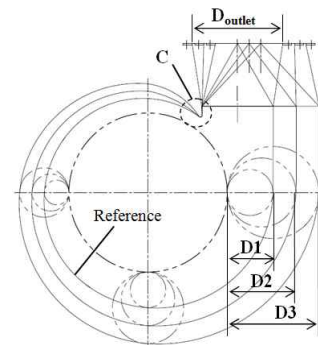


Fig. 10 Response surface of efficiency (%)
(contour intervals: 0.25)

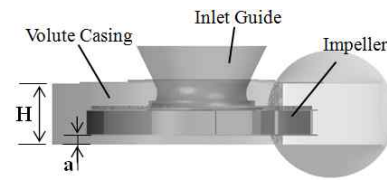
본 연구에서는 터보블로어의 주요 성능변수를 최적화하기 위하여 선정된 설계변수들이 목적함수에 미치는 영향을 수치 통계적인 방법으로 분석할 수 있는 반응면 기법(response surface method)을 도입하였다. 반응면 기법을 이용한 터보블로어 형상 최적화 설계 수순을 Fig. 8에 나타내었다. 먼저 터보블로어의 형상 최적화의 목표인 목적함수 (objective function)를 결정하고, 목적함수의 값이 최대화될 수 인자, 즉 설계변수 (design variables)를 선정한다. 다음으로 선정된 형상변수를 이용하여 수치 실험점을 결정해야 한다. 선정된 수치실험조건에 따라 삼차원 수치해석을 수행하여 목적함수값을 결정하게 된다. 각각의 수치 실험점에서 얻어진 목적함수값을 이용하여 반응면을 구하는데, 본 연구에서는 2차 다항식으로 반응면 모델을 형성하고, 각 항의 미정계수는 회귀분석을 통하여 구하였다. 미정계수의 타당성은 ANOVA (Analysis of Variance)와 회귀분석(Regression Analysis)을 이용하여 검증 하였다.⁽⁸⁾⁻⁽⁹⁾

Fig. 9 및 Fig. 10은 터보블로어 입구가이드 곡률반경(R) 및 경사각(A)에 대한 최적화 결과 및 반응면을 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 반응면기법을 이용한 설계형상 최적화로 목적함수에 대한 각 설계변수의 성능특성을 쉽게 파악할 수 있다. 기존의 연구에서는 터보블로어의 입구가이드⁽¹⁾ 외에도 임펠러 입출구각도⁽¹⁰⁾ 및 케이싱⁽¹¹⁾에 대한 형상 최적화 연구를 수행하였다.



(a) expansion diameter of casing



(b) width of casing

Fig. 11 Definition of design variables

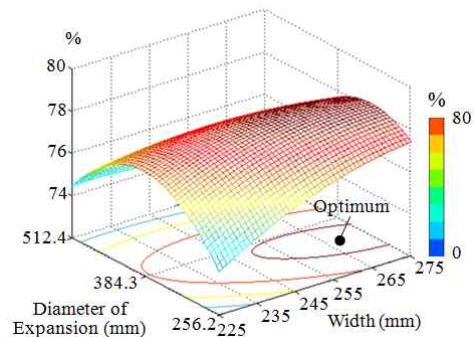


Fig. 12 Response surface for efficiency

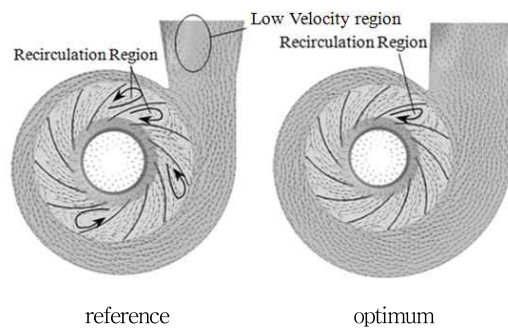


Fig. 13 Tangential velocity vector at the mid-height of impeller

Fig. 11은 볼류트 케이싱에 대한 최적설계 변수의 정의를 나타낸다. 케이싱의 형상을 정의하는 케이싱의 확대반경(D) 및 케이싱 폭(H)을 설계변수로 하여 최적설계를 수행하였다. 두 설계변수에 대하여 블로어 효율을 목적함수로한 반응면을 Fig. 12에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 케이싱 폭은

큰 쪽이 효율에 유리하나, 제한적인 폭을 나타냄을 알 수 있다. 확대반경도 최적의 효율위치가 설정 경계조건 내에 있음을 알 수 있다. 여기서 고려할 사항은 비록 축방향 간격이 작을수록 성능특성은 개선되지만, 제작 및 운전의 안정성을 고려하여 제한을 두어 설계하여야 한다.

Fig. 13은 기존 및 최적설계를 통하여 도출된 형상에 대한 속도벡터값을 나타낸다. 기존 케이싱 형상에서는 임펠러 익간에서 부분적인 재순환 영역이 많이 발생하였으나, 최적화된 형상에서는 많이 줄어들음을 알 수 있다. 또한 케이싱 출구측에서도 기존형상에서 나타나는 저유속영역 없이 케이싱을 따라 상대적으로 균일하게 토출됨을 알 수 있다.

5.2 주요 설계인자의 성능특성

터보블로어 설계에 있어서 기본설계를 통하여 도출된 설계변수를 기반으로 각 인자의 변화량에 따른 효율 및 압력 등 성능특성에 미치는 영향을 분석하였다. 터보블로어 성능 향상을 위하여 고려할 수 있는 설계 변수로는 임펠러에서는 임펠러 입,출구각도, 임펠러의 보조날개(splitter)⁽³⁾, 임펠러 날개 단면형상 등을 들 수 있다. 케이싱측면에서는 케이싱의 폭 및 확대반경, 입구가이드 형상 및 임펠러-케이싱과의 매칭설계 등이 설계변수로 설정할 수 있다. 이외에도 임펠러 날개의 신형상 설계, 소음 저감을 위한 부분적인 케이싱 분리막 설치 및 재료특성을 고려한 설계 등 다양한 방법들이 제시되고 있다.

생활폐기물 관로이송 설비에서 사용되는 터보블로어는 4-5대의 터보블로어가 직렬로 연결되어 운전되기 연결 관로의 설계 최적화도 요구된다. 연결덕트에서는 Fig. 14에서와 같이 메인관과 블로어로 분기되는 분기관과의 연결형상 및 터보블로어 상류측에 설치되는 입구박스(Inlet Box)의 설계최적화가 필요하다. 4대의 블로어가 직렬로 연결된 경우의 메인관과 분기관과의 연결부분의 곡률반경에 대한 성능특성을 분석하였다.

수치최적설계를 통한 입구반경(R1) 및 출구반경(R2) 개선을 통하여 압력이 약 1퍼센트 향상됨을 알 수 있었다. 각단에 서의 기존 및 개선된 곡률반경을 갖는 연결관에 대한 압력특성을 Fig. 15에 나타낸다.

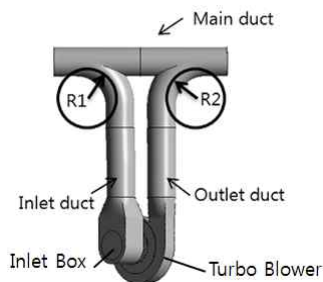
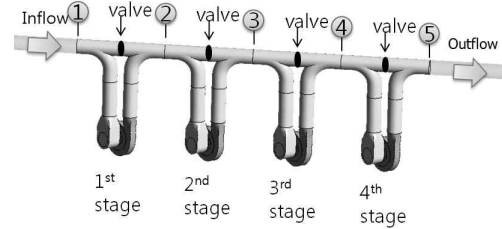
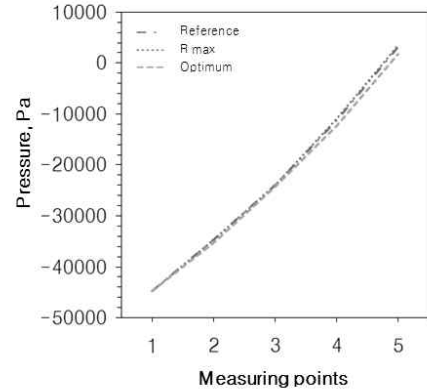


Fig. 14 Definition of radius of curvature



(a) measuring positions



(b) pressure distribution

Fig. 15 Pressure for reference and optimum

6. 결 론

생활폐기물 관로이송용 터보블로어 단품 및 다단 직렬연결 시스템에 대한 고효율화 연구 내용 및 연구사례들을 고찰하였으며, 수치최적설계를 통한 설계 데이터베이스 구축을 계속 수행 중이다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 10032063)

참고문헌

- (1) Jang, C.-M., Lee, S.-Y., and Yang, S.-H., 2009, "Efficiency Enhancement by Shape Optimization of Centrifugal Fan Installed in Refuse Collecting System," ASME FEDSM2009-78491.
- (2) Jang, C.-M., Kim D.-W., and Lee, S.-Y., 2008, "Performance Characteristics of Turbo Blower in a Refuse Collecting System According to Operation Conditions," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, pp. 1896-1901.

- (3) Cui, B., Zhu, Z., Zhang, J. and Chen, Y., 2006, "The Flow Simulation and Experimental Study of Low-Specific-Speed High-Speed Complex Centrifugal Impellers", Chinese J. Chem. Eng., Vol. 14, pp. 435-441.
- (4) Bayomi, N. N., Abdel Hafiz, A., and Osman, A. M, 2006, "Effect of Inlet Straighteners on Centrifugal Fan Performance," Energy Conversion & Management, Vol.47, pp. 3307-3318.
- (5) AMCA 210(ASHRAE 51) Standard, 1999, "Laboratory Methods of Testing Fans for Aerodynamic Performance Rating", AMCA International, Inc. and ASHRAE, Inc..
- (6) CFX-12 User Manual, 2008, Ansys inc.
- (7) Jang, C.-M., Yang, S.-H., 2009, "Performance Characteristics on Turbo Blowers Connected in Serial and Controlled by Inverter," The 10th Asian International Conference on Fluid Machinery Kuala Lumpur, Malaysia, PaperID 96.
- (8) Mentz, F. and Esch, T., 2001, "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," Proceedings of 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (CPBEM), CD-ROM.
- (9) Myers, R. H., and Montgomery, D. C., 1995, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, NewYork.
- (10) Jang, C.-M. and Lee, S.-Y., 2008, "Blade Optimization of Turbo Blower in Refuse collecting System," The Seventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference. G221.
- (11) Jang, C.-M. and Yang, S.-H., 2008, "Design Optimization of a Volute Casing in a Centrifugal Fan Installed in a Refuse Collecting System," ISROMAC-13, Paper ID_86.