

성능 및 소음의 Inverse Design Method를 이용한 송풍기(팬) 설계

이승배*

1. 서 론

팬 혹은 송풍기의 공력학적 설계에 관한 연구는 지난 수 십년간 지속되어 설계기법에 있어 많은 발전이 이루어졌다. 그러나 최근에는 성능뿐 아니라 소음에 대한 요구수준이 높아지고 제품의 생산주기가 단축되어 보다 높은 수준의 설계수단의 개발을 필요로 하게 되었다.

공력학적 최적설계기법은 설계방법에 따라 역설계기법(Inverse Design Method)⁽¹⁾과 수치최적기법(Numerical Optimization Method)⁽²⁾으로 구분된다. 역설계기법은 설계자가 설정한 물리장을 만족시키도록 형상을 변경하여 설계하는 방법이고, 수치최적설계기법은 설계목표를 함수화하여 이 함수의 값이 최소나 최대가 되도록 형상을 변경해 가는 방법이다.

역설계기법은 시스템이 요구하는 최적형상에서의 물리장을 미리 정해 놓고 이에 합당한 날개의 형상을 구하는 방법으로 지금까지는 단순한 익형의 설계⁽³⁾에 사용되어 왔으나, 최근 들어 매우 복잡한 유동장에도 그 적용이 시도되고 있다⁽⁴⁾.

또한 산업사회의 기술이 발전함에 따라서 소음원이 발생하게 되어 생활의 질적인 향상이 요구되는 선진사회에서 소음원에 대한 인간의 개선욕구도 소음원에 따라 다양하며 그 수준도 점차 높아 가고 있는 실정이다.

산업용, 자동차, 사무기기, 가전제품에 적용되는 팬의 성능을 향상시키는 노력이 어느 정도 성과를 거두면서, 저소음화에 대한 많은 시도가 이루어 지고 있으나 많은 변수들로 인해 각 변수들의 소음에 대한 기여도 평가 및 이를 고려한 설계는 더더욱 어려운 실정이다.

그러나 외국에서는 터보기계의 설계단계 중 기초설계에서 다양한 소프트웨어(meanline analysis, FEA, CFD, 3D Blade Design, Rapid Prototyping)등의 OLE(Object

Linking Embedding)를 이용한 조합 및 DFMA(Design for Manufacturing and Assembly) 기법 적용의 동시공학(Concurrent Engineering)이 도입되고 있다^{(5),(6)}.

본 연구에서는 역설계 개념을 도입하여, 주어진 회전수에서 유량과 전압을 갖는 팬의 최적의 형상을 평균유선법과 손실을 고려한 성능예측을 통해 1차적으로 구현한다. 이를 바탕으로 날개 후류에서의 전압의 분포함수를 다시 역설계 변수로 사용하여 다차원 시간영역 음향역설계를 수행한다. 또한 반복 설계과정 중 BEM 및 CFD 해석이 가능하도록 날개설계과정이 Bezier 설계방식으로 연동되어, 유동 역설계도 가능하도록 한 소프트웨어인 iDesignFanTM을 개발하였다.

2. 본론

2.1 성능예측 및 1차 설계

축류형 송풍기는 원심형 및 사류형 등에 비하여 상대적으로 비속도가 크고 비직경이 작아 동일한 직경 및 부하에서 큰 유량을 얻을 수 있는 장점을 지닌다. 따라서 축류형 팬은 산업용 송풍기뿐만 아니라 공조기기, 자동차/중장비의 냉각팬, 에어컨 실외기, 냉장고 등의 가전제품, 그리고 컴퓨터 CPU 냉각팬 및 각종 O.A.기기, 네트워크 장비등의 냉각장치등 그 활용범위가 매우 광범위한 유체기계중의 하나이다.

이러한 축류형 팬의 성능과 관련된 변수들은 회전수(N), 직경(D), 전압(P_T) 등이 있으며, 이러한 성능변수와 밀접한 유속변수로는 평균축방향속도(C_m), 유입스윙속도(C₀₁), 출구스윙속도(C₀₂)가 있다. 또한 팬날개형상과 관련된 변수들로는 입구날개각(β_1), 출구날개각(β_2), 캠버각(θ), 설치각(ξ), 전향각(δ), 영각(i), 코드길이(c), 현절비(σ), 스윙각 등이 있다. 따라서 모든 축류형 팬의 설계는 주어진 작동점에서 요구되는 성능을 발휘하도록

* 인하대학교 기계공학부, 회원
E-mail : sbaelee@inha.ac.kr

이들 변수들을 적절히 조합하는 방법과 연관되어 진다.

축류형 팬의 설계 단계는 이차원 익렬이론을 바탕으로 하여 각 익렬에 대한 실험식과 상관식을 이용하는 평균유선법⁽⁷⁾, 손실모델을 고려한 피치평균의 비점성 유동해석인 통과유량법(Through-Flow Method)⁽⁸⁾, 그리고 삼차원 점성 수치해석적 방법을 이용한 최적화 설계⁽⁹⁾로 구분될 수 있다.

또한 다양한 시제품들에 대한 성능시험을 통해 얻어진 자료들을 데이터베이스화하여 고객이 원하는 조건에 적합한 표준제품을 자동으로 선정해 주는 연구도 수행되고 있다.⁽¹⁰⁾

본 설계 프로그램의 계산과정은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 즉, 사용자 입력 부분과 날개 형상 변수계산 부분, 성능예측 부분, 날개 삼차원 형상 계산부분, 소음 예측 부분으로 나누어진다. 사용자 측면에서 입력부에서의 여러 경우를 고려하며, 각각의 경우에서 축류팬에 적당한 작동 조건을 찾도록 설계한다. 판별 기준으로는 비속도와 비직경을 사용하며, 입력 부분의 모든 계산은 날개 형태와 관계없이 적용된다.

설계 변수들은 반경방향으로 한 날개를 31등분하여 각 미소 단면마다 Howell⁽¹¹⁾의 2차원 관계식을 이용하여 1차적으로 계산한다.

$$i = i_0 + \left(\frac{n_0}{\sigma^c}\right)\theta \quad (1)$$

$$i_0 = f(\sigma, \beta_1), \quad n_0 = f(\sigma, \beta_1), \quad c = f(\sigma, \beta_1)$$

$$\delta = \delta_0 + \left(\frac{m_0}{\sigma^b}\right)\theta \quad (2)$$

$$\delta_0 = f(\sigma, \beta_1), \quad m_0 = f(\sigma, \beta_1), \quad b = f(\sigma, \beta_1)$$

여기서 i 는 입구 입사각이며, δ 는 출구 이탈각이다. θ 는 캠버각, σ 는 절현비, β_1 은 입구유동각, 그리고 β_2 는 출구 유동각을 각각 나타낸다.

압력 상승을 맞추기 위해 코드길이(c)를 조정하였다. 코드길이(c)가 변할 때마다 현절비(σ)가 변하게 되고 그와 관련된 여러 변수들이 바뀌게 된다. 따라서 압력 상승을 맞출 때마다 현절비(σ)와 관련된 모든 변수들을 다시 계산한다. 계산을 통해 수렴한 변수들을 날개 끝에서 발생하는 슬립을 고려하여 다시 계산하며, 최종적으로 소음을 고려하여 캠버각(θ)과 코드길이(c)를 결정한다. 위 과정들은 효율이 수렴할 때까지 반복 계산되며, 효율이 수렴하였을 때 변수 값들을 이용하여 팬의

iDesignfan™ flow chart

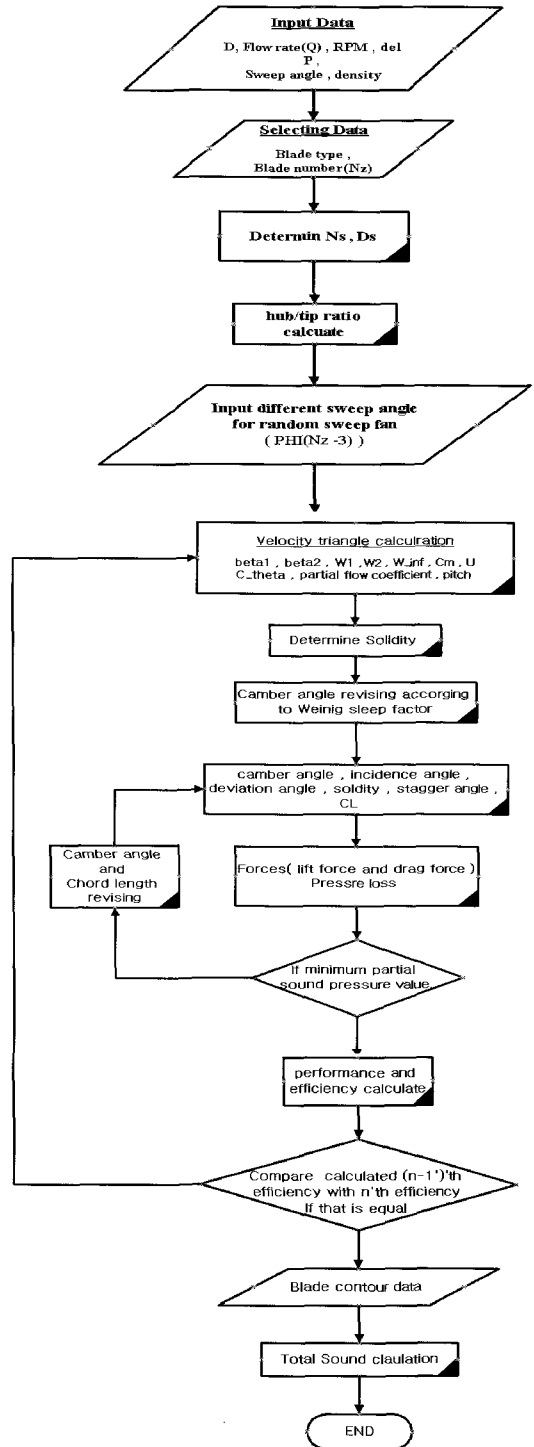


Fig. 1 Meanline design flowchart

삼차원 형상 수치들을 계산하게 된다. 삼차원적으로 형상을 구현할 때는 회전하는 물체 표면에서의 유선(stream line)을 고려하여 Fig. 2와 같이 날개를 형상화한다. 그러나 시스템에서 요구되는 유선이 축 방향이 아닌 경우, 이를 고려하여 유선방향으로 에어포일을 형상화할 수도 있다.

Fig. 2의 과정들을 거쳐 최종적으로 설계된 팬의 삼차원 형상의 예들은 Fig. 3에 나타나 있다.

iDesignFanTM 프로그램에서는 설계변수들과 설계조건들을 그래프나 표로 나타내주어 사용자가 쉽게 팬 특성을 1차적으로 알아보고 판별할 수 있도록 되어있어, 매우 신속하게 원하는 성능의 팬의 형상을 구현할 수가 있다. **iDesignFanTM** 프로그램의 장점은 팬의 형상을 신속하게 계산할뿐만 아니라, 소음과 성능까지도 함께 예측을 하는데 있다. 이 프로그램의 입·출력은 Fig. 4와 같이 나타난다.

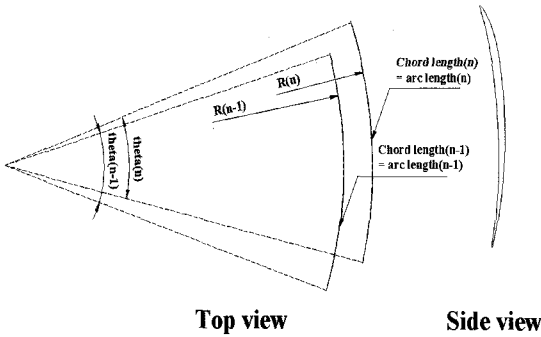


Fig. 2 Blade stacking method along streamlines

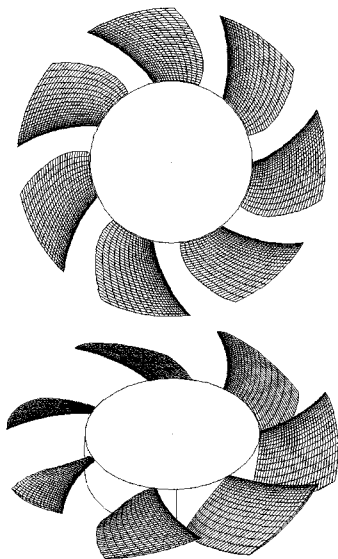


Fig. 3 Three-dimensional view of impeller

2.2 공력학적 역설계 기법

공력학적 역설계기법은 설계자가 설정한 속도장을 만족시키도록 형상을 변경하여 설계하는 방법으로 지금까지는 단순한 항공기 익형의 설계에 사용되어 왔으나, Zangeneh(1991)가 구속 circulation인 $2\pi rV\theta$ 를 통한 와도 쉬트(sheet)로 3차원 날개 모양을 구하는 방법을 제안한 이후 터보기계 설계에의 적용이 활발해 지고 있다. Fig. 5는 Goto 등이 펌프 디퓨저설계에 적용한 구속 circulation 분포함수의 예이다.

iDesignFanTM 프로그램에서는 제 2.1절의 1차 설계를 바탕으로 임펠러의 허브에서 끝단까지의 전압력 분포를 변경하게 된다. 즉, 주어진 평균성능을 만족하도록 날개 자오면 하류에서의 평균 전압력은 유지하면서 재순환영역과 같은 날개 위의 3차원 와동이 발생하지 않도록 경험적으로 전압력 분포를 생성하면, 이에

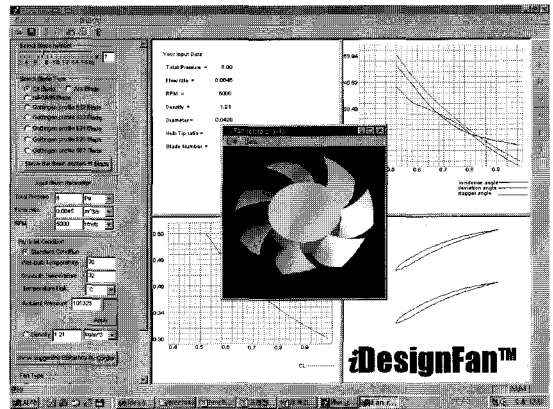


Fig. 4 iDesignFanTM window demo.

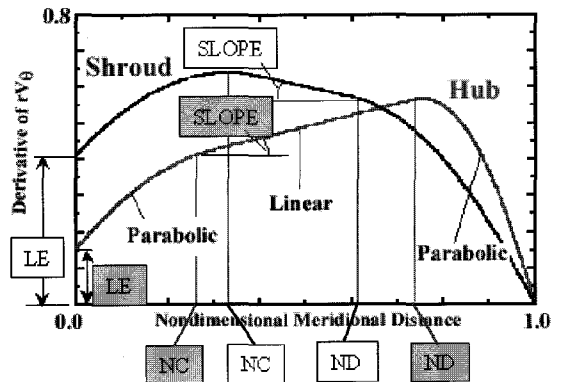


Fig. 5 Goto, A. (Ebara Research Co., 2001) 등이 Pump설계에 적용한 $\frac{\partial(rV_\theta)}{\partial m}$ 분포함수

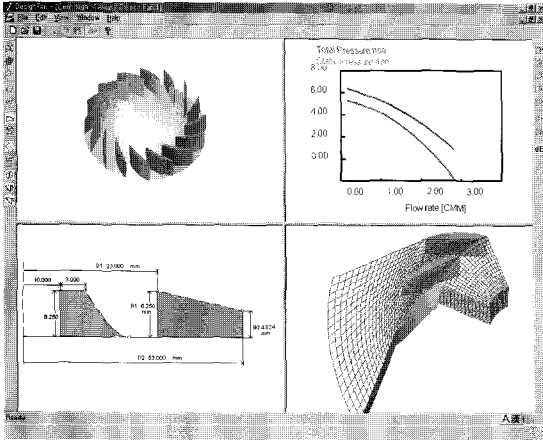


Fig. 6 Automatic grid-generation with 3-D CAD in turbo-fan design and performance prediction

연동된 3-D CAD 모델링과 자동 격자 생성모듈을 통해 CFD 해석을 자동적으로 수행하여 실제 유동 및 성능에 근접하는 설계를 하게 된다.

2.3 팬 소음의 예측

팬 혹은 송풍기의 성능 및 효율을 향상시키는 노력이 어느 정도 성과를 거두면서, 저소음화에 대한 많은 시도가 이루어 지고 있으나, 많은 변수들로 인해 각 변수들의 소음에 대한 기여도 평가 및 이를 고려한 설계는 더더욱 어려운 실정이다. 이러한 기술적 어려움을 극복하기 위해 저소음 설계의 보조적 수단으로 주어진 팬형상 및 작동조건으로부터 팬소음을 예측할 수 있는 소음해석 소프트웨어들이 최근 많이 개발되고 있다. 현재 국내에서 개발된 팬소음해석 소프트웨어는 네 가지 방법으로 나누어 진다. 첫째는 팬날개 주위의 비정상 와동을 비점성적 방법으로 계산한 후, 이를 바탕으로 음향학적 상사성 이론 및 팬 케이싱 등에 의한 산란, 반사 및 회절을 계산하는 경계요소법을 이용하여 소음장을 예측하는 방법⁽¹²⁾과 설계변수에 의해 예측되는 양력계수분포를 이용하여 정상하중소음을 예측하는 방법⁽¹³⁾, 그리고 날개후단에서의 와동모델을 바탕으로 한 비정상양력에 의한 소음예측방법⁽¹⁴⁾, 그리고 삼차원 난류유동을 계산한 후, 이와 함께 CAA방법을 이용하여 FW-H방정식을 계산하는 방법이다⁽¹⁵⁾.

움직이는 물체의 표면을 $f(x, t) = 0$ 로 표시한다면, 질량 및 운동량 보존방정식은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = \rho_o u_i \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j + P_{ij}) = P_{ij} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_j} \quad (4)$$

위 식을 이용하여 비균일 파동식을 구하면 다음과 같은 Ffowcs Williams-Hawkings(FW-H) 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_o^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_j^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (P_{ij} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_o u_i \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i}) \quad (5)$$

식(5) 우변의 첫째항은 Lighthill 방정식의 생성항과 같은 변동하는 레이놀즈 응력에 의한 소음인 사극소음 원이며, 둘째항은 물체표면에 의해 유체에 작용하는 단위면적당 이극소음원 강도들의 분포에 의한 소음을 나타낸다. 셋째항은 물체의 표면에서 수직방향으로의 가속도에 의한 단극소음원의 기여를 나타낸다.

위 식을 풀기위해 시·공간 변수들에 대해서 시간영역방법(Time-domain method)이 사용된다. 이 방법은 주파수영역방법(Frequency-domain method)에 비해 임의의 물체표면 형상에 대해 더욱 정확하게 적용될 수 있기 때문에 널리 사용되고 있다. Farassat 등⁽¹⁶⁾은 시간영역방법을 이용하여 로터에서 수치계산에 용이하도록 개선된 형태의 FW-H 방정식을 발표하였다. 다음 식은 Farassat의 Formulation 1A이며 아음속 소음 원으로부터 음압 P(t)를 구할 수 있다.

$$P_M'(x, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{f=0}^{ret} \left[\frac{\rho_o \dot{v}_n}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0}^{ret} \left[\frac{\rho_o v_n (r \dot{M} \cdot x + c_o M_r - c_o M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (6)$$

$$P_D'(x, t) = \frac{1}{4\pi c_o} \int_{f=0}^{ret} \left[\frac{F \cdot r}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0}^{ret} \left[\frac{F_r - F \cdot M}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \frac{1}{4\pi c_o} \int_{f=0}^{ret} \left[\frac{f_r (r \dot{M} \cdot x + c_o M_r - c_o M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (7)$$

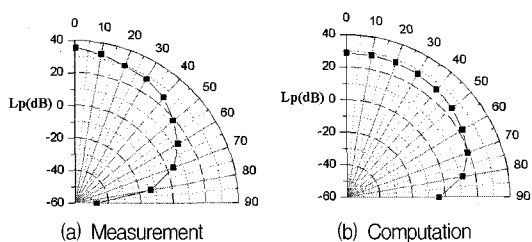


Fig. 7 Polardiagram of sound pressure levels at $r/D=33$ and 500rpm

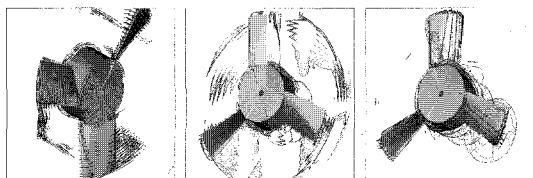


Fig. 8 Computed vorticity distributions in x, y, z directions

팬의 소음계산에 있어, LES를 이용하여 직접 소음을 예측하는 것은 현재의 계산능력으로는 상당히 많은 시간이 소요되기 때문에, 본 연구에서는 *iDesignFan*TM 프로그램을 이용하여 예측된 정상상태의 양력 및 항력을 기초로 $r/D=33$ 인 원거리장에서의 정상하중(steady loading)에 의한 소음을 계산하였다. Fig. 7에는 500 rpm에서 직경이 30.25 cm인 DRL fan에서의 소음 방향성과 음압이 나타나 있다. 쌍극자만을 고려하여 계산한 음압 레벨의 크기 및 방향성은 실험결과와 잘 일치한다. 계산으로부터 얻어진 음압레벨은 실험조건에서의 회전속도와 측정거리를 고려하여 실험치와 비교하기 위해 스케일링하였다. 여기서 0°는 팬의 축방향으로 유동방향은 0°에서 180°쪽이다. 이 결과로부터 정상하중(steady loading)만을 고려해도 팬의 원장소음은 어느 정도로 예측됨을 알 수 있다.

또한 비정상유동을 LES(Large-Eddy Simulation)을 이용하여 계산된 날개 주위의 유동장(Fig. 8)을 구한 후, 다음의 사극자음원을 구하는 식을 보완하여 보다 정확한 방사소음을 계산할 수 있다.

$$4\pi p_{\alpha}(t) = \frac{1}{c^2} \int_V \left[\frac{r_i r_j}{r^3(1-M_r)} \left\{ \frac{1}{1-M_r} \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{T_{ij}}{|1-M_r|} \right\} \right] dS \quad (8)$$

2.3 팬 소음의 역설계

역변환 기술은 음원의 재생 및 음원의 설계적 관점에서 최근 각광을 받고 있다. 이 기술은 크게 간접 경계

요소법(Indirect Boundary Element Method)과 시간영역법으로 나눌 수가 있다. 간접경계요소법에서는 주파수 영역에서 주어진 소음원 함수와 관찰자 사이의 전달함수를 구한 후, 이 전달함수의 역행렬을 구하여 소음원 근처에서의 음향 경계를 정의하는 방법이다. 그러나 이 시스템 행렬이 대개는 특이 행렬이 되며, 비최소위상 시스템의 문제를 해결해야 하는 어려움이 존재한다. 또한 시간영역법에서의 역변환 기술은 비교적 많은 메모리와 많은 계산 시간을 요하는 제약 조건이 존재하게 된다.

이러한 음향 역설계를 위해서는 음원에 대한 정확한 정보가 필수적이나, 팬과 같은 복잡한 유동에 의한 소음방사는 간접경계요소법이나 시간영역법 모두 분명한 한계를 지니게 된다. 그러나 후류에서의 전압력 분포의 변화에 따라 날개 위의 부하 분포가 달라지게 되며, 이는 소음방사에 지대한 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 개념을 이용하여 *iDesignFan*TM 프로그램에서는 임펠러의 허브에서 끝단까지의 전압력 분포함수를 임의로 변경하여 각 경우에 대한 소음분포함수를 구한 후, 1차 설계된 형상에서 날개 부하의 변화에 의한 소음방사 효율의 변화는 선형적이라고 가정 후, 주어진 음압경계 조건을 만족하는 날개부하 분포함수를 역행렬을 이용하여 구하게 된다.

3. 결 론

당사에서는 터보기계의 설계단계 중 기초설계에서 다양한 소프트웨어인 평균유선설계, Bzier를 이용한 3차원 CAD를 이용한 3D 날개 설계, CFD의 OLE(Object Linking Embedding)를 이용한 조합 및 팬날개의 역설계를 구현하며, 다차원 음향역설계를 통하여 원거리장 소음 음압레벨을 최소화하는 기법을 적용한 *iDesignFan*TM 프로그램을 개발하였다.

또한 팬 성능/소음을 고려한 역설계 뿐만 아니라 상세한 해석적 연구가 가능하도록 LES 및 Kirchhoff-BEM을 이용한 음향 계산 Module도 제공된다.

참고문헌

- (1) Zangeneh, M, 1991, "Compressible Three Dimensional Blade Design Method for Radial and Mixed Flow Turbomachinery Blades," Int'l J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 13, pp. 599~624.

- (2) Vanderplaats, G.N., 1984, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill Book Co.
- (3) Selig, M.S., 1994, "Multipoint Inverse Design of an Infinite Cascade of Airfoils," AIAA J., Vol. 32, No. 4, pp.774~782.
- (4) Sakurai, T., Siato, S., Goto, A., Ashihara, K., 1999, "Pump Design System based on Inverse Design Method and Its Application to Development of Diffuser Pump Series," ASME FEDSM99-6849, San Francisco, pp. 1~11.
- (5) Goto, A., Nohmi, M., Sakura, T., Sogawa, Y., 2001, "Hydrodynamic Design System for Pumps Based on 3-D CAD, CFD and Inverse Design Method," ASME FEDSM2001-18068, New Orleans, pp. 1~9.
- (6) Japikse, D., 1996 "Agile Design System in the age of Concurrent Engineering," presented to the 1996 JANNAF Propulsion Subcommittee Meetings, Albuquerque, New Mexico.
- (7) Lee S., Choi J.-K. and Park Y.-S., 1997, "A Method of Designing a Low Noise Propeller Fan," ASME FEDSM'97, pp. 1~9.
- (8) 김성근, 1999, 축류형 송풍기의 성능 예측 방법에 대한 비교 연구 및 설계 개선, 석사학위 논문, 수원대학교.
- (9) 최재호, 2000, 유체기계의 공력설계를 위한 수치 최적화기법, 박사학위논문, 인하대학교.
- (10) 김희룡, 2000, "산학연 연구를 통한 축류송풍기의 표준제품 선정 software 개발," 2000년도 하계 송풍기기 Workshop, pp. 53~57.
- (11) Wright, I, 1999, *Fluid Machinery*, CRC Press.
- (12) 전완호, 이덕주, 2000, "덕트가 있는 축류팬의 유동 및 음향장 해석," 유체기계저널, 제 3권 제2호, pp. 15~23.
- (13) Sharland, I.J., 1964, "Sources of Noise in Axial Flow Fans," J. of Sound & Vibration, Vol.1, pp. 302~322
- (14) Lee, C., Chung, M.K. and Kim, Y.H., 1993, "A Prediction Model for the Vortex Shedding Noise from the Wake of an Airfoil or Axial Flow Fan Blades," J. of Sound & Vibration, Vol.164, pp. 327~336
- (15) Bae, I.-S., Kim, H.-J., Lee, S., 2002, "Computation of Turbulent Flows and Aero-Acoustics from an Axial Fan", ASME FEDSM 2002-31327.
- (16) Farassat, F. and Myer, M.K., 1988, "Extension of Kirchhoff's Formula to Radiation from Moving Surfaces," J. Sound and Vib., Vol. 123, No. 3, pp. 451~461.
- (17) Zhang, Z., Vlahopoulos, N., Raveendra, S.T., Allen, T., Zhang K.Y., 2000, "A Computational Acoustic Field Reconstruction Process Based on an Indirect Boundary Element Formulation," J.A.S.A., Vol. 108(5), pp. 2167~2178.
- (18) Gustafsson, M., He, S., 2000, "An Optimization Approach to Multi-dimensional Time Domain Acoustic Inverse Problems," J.A.S.A., Vol. 108(4), pp. 1548~1556.