

냉각탑용 축류팬 형상 정밀도 측정 시스템

강재관[#], 이광일^{*}

Surface Profile Measuring System for Axial Fan of Cooling Towers

Jae-Gwan Kang[#], Kwang-Il Lee^{*}

ABSTRACT

An important component of a cooling tower is an axial fan, and there happens distortion in its shape which brings significant loss of efficiency. In this paper, a surface profile measuring system for large size axial fan of cooling towers is developed. A laser sensor is used as a measuring device and aluminum profiles and stepping motors are engaged into the system as frame structure and driving devices respectively. The measuring data are compared to the design data to compute the distortion of the axial fans. Two types of errors, axial and twist errors, are used to represent the precision of axial fan distortion. Genetic algorithm is used to solve the optimization problem during computing the precision. Results are displayed three dimensionally in a solid-modeler as well as 2-D drawings to help users find it with ease.

Key Words : Cooling Tower(냉각탑), Axial Fan(축류팬), Airfoil(익형), Precision Measurement(정밀측정), Genetic Algorithm(유전자알고리즘), CMM(3차원 측정기)

1. 서론

최근 주상복합 형태의 건물이 많아지고 건물 밀집화가 진행됨에 따라 냉각탑에서 발생하는 소음과 진동 등에 대한 민원이 빈번하여 냉각탑 제조업체는 더욱 고품질의 제품을 생산하도록 요구받고 있다. 냉각탑을 구성 요소 중 가장 중요한 부품은 냉각탑의 성능을 결정하는 축류 팬이다. 축류 팬의 소재로는 종래 알루미늄이 사용되어 왔으나 최근 들어서는 내후성 및 경량화를 위하여 대부분 F.R.P.를 사용하고 있다.

그러나 F.R.P.를 사용할 경우 소재의 특성상 제품의 경화 과정 또는 경화 후 수축이나 뒤틀림 등

의 변형이 발생하게 된다. 이러한 변형은 축류팬의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 고소음 및 진동 발생의 원인이 된다. 또한 궁극적으로는 팬에 피로 하중이 지속적으로 작용하여 감속기 축과 같은 부가 장치와 충돌하여 파손되는 심각한 사고로 연결되기도 한다. 따라서 축류팬 제작 시에는 가능한 한 변형이 적게 발생하는 공법의 개발이 요구되며 이를 위해서는 축류팬의 변형을 정밀 측정할 수 있는 측정 시스템을 구축하는 것이 필요하다.

축류팬에 관한 기존의 연구로는 냉각탑용 축류팬 설계 및 공정 자동화에 관한 연구^{1,2} 및 가전제품에 사용되는 소형 축류팬에 관한 연구^{3,4} 등 축류팬 설계 방법에 대한 연구 등이 대부분이다. 곡면

접수일: 2004년 9월 14일; 게재승인일: 2005년 2월 18일

교신저자: 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail: jkang@kyungnam.ac.kr, Tel: (055)249-2703

* 경남대학교 대학원 기계공학과

형상의 측정 및 분석의 경우에는 자유곡면의 3차원 측정데이터를 이용하여 형상을 모델링하는 역공학(reverse engineering)에 관한 연구들⁵⁻⁷과 터빈 프로펠러의 단면 형상인 에어포일의 측정에 관한 기존의 연구^{8,9}등이 있다. 그러나 이러한 일반적인 자유곡면 측정에 관한 연구들은 냉각탑용 축류팬 정밀 측정에 직접 적용하기가 용의하지 않다. 대형의 냉각탑용 축류팬을 측정하기 위해서는 측정 방법 및 장치, 축류팬의 변형의 종류, 측정 정밀도 정의 등에 대한 연구가 선행되어야 한다.

형상의 3차원 측정에 사용되는 대표적인 방법으로는 접촉식 프로브를 부착한 3차원측정기(CMM)를 이용하는 것이 일반적이나 측정물을 일정 간격으로 샘플링하기 때문에 측정에 많은 시간이 소요되고 측정데이터를 획득한 후 프로브 반경 보정 등의 후처리 과정이 필요하다. 최근들어 많이 활용되고 있는 정밀도 높은 비접촉식 레이저 센서를 이용한 CMM¹⁰⁻¹¹은 접촉식에 비하여 정밀도는 떨어지지만 곡면 데이터값을 빠른 시간내에 얻을 수 있으며 프로브 반경 보정이 필요없는 장점이 있다. 그러나 접촉식이든 비접촉식이든 상용 CMM 측정기는 고가이며 측정 범위가 커질수록 측정기 가격이 매우 비싸지기 때문에 냉각탑용 축류팬과 같은 대형 측정물의 측정에는 적당하지 않다.

따라서 본 연구에서는 냉각탑용 축류팬이 대부분 영세한 중소기업에서 제작되는 국내의 현실을 감안하여 대형물(축류팬 직경 1,000mm ~ 4,000mm)의 3차원 형상을 측정할 수 있는 저가형 측정 장비를 개발한다. 또한 축류팬의 설계데이터와 개발된 측정기를 이용한 측정데이터를 비교하여 축류팬의 변형 정도를 정량적으로 계산하는 체계적인 방법이 제시된다.

본 연구에서는 기존의 연구에서 개발된 축류팬 설계 프로그램¹을 통하여 설계데이터를 취득하며 개발된 알고리즘의 구현은 개발의 용의성 및 솔리드 모델러와의 인터페이스를 원활하게 하기 위하여 솔리드 모델러가 제공하는 API (Application Programming Interface)를 이용한다. 본 연구의 축류팬 설계 및 측정기를 이용한 측정, 그리고 결과 분석에 이르는 과정을 요약하면 Fig. 1과 같다.

2. 축류팬 및 전용 3차원 측정기 개발

2.1 냉각탑용 축류팬

냉각탑용 축류팬의 단면을 익형(airfoil)이라 한다. 익형은 Fig. 2와 같이 축류팬의 중심으로부터 각 동심원상에 정의되며 미국 항공우주연구국 NASA에서 설계한 익형(NACA 시리즈라 부른다)이 많이 사용된다.

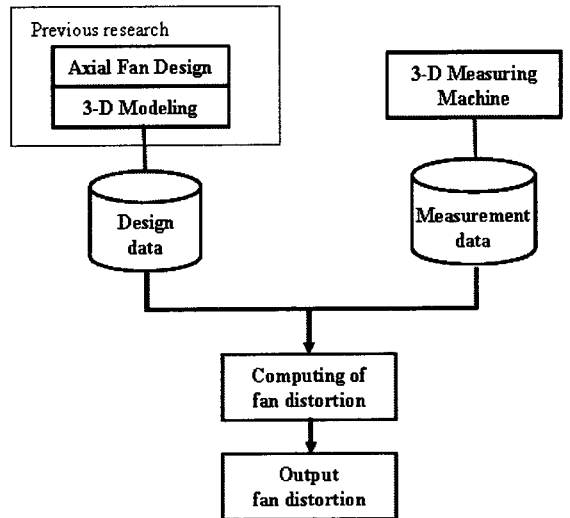


Fig. 1. Structure of systems

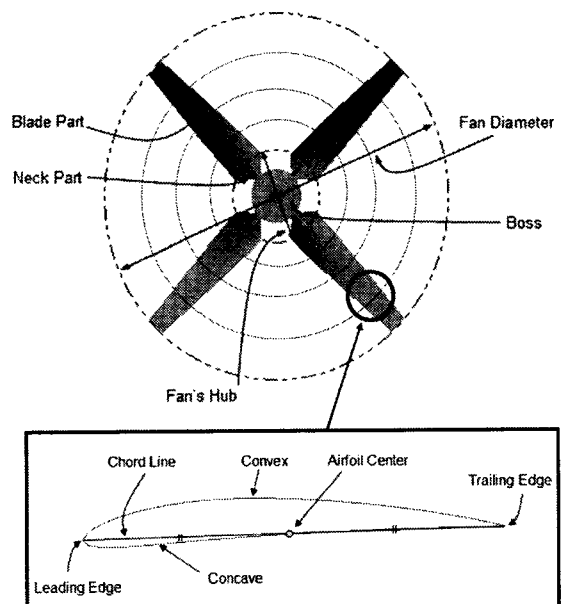


Fig. 2 Axial fans of cooling towers

익형의 위쪽을 상면, 아래쪽을 하면, 익형의 길이를 코드랭스(chord length), 익형의 중심선을 코드선(chord line)이라 부르며 익형은 팬의 중심축을 따라 각각 일정각도(twist angle) 비틀려 설계된다. 본 연구에서 축류팬 중심축은 y축을, 익형은 x축, 상면 및 하면은 z축을 따라 설계되는 것으로 가정한다. 즉 축류 팬을 설계하는 것은 요구하는 풍량과 정압을 만족시키도록 팬 중심에서 동심원 상에 위치할 익형의 길이(chord length), 비틀림 각도(twist angle)등을 결정하는 것이다¹².

2.2 축류팬의 형상 정밀도

축류팬의 형상정밀도는 제작된 축류팬이 설계 데이터와 얼마만큼 차이가 있는가이다. 본 연구에서는 축류팬의 형상정밀도를 축류팬의 단면에 대하여 설계 익형과 측정 익형 간의 위치 데이터 차이로 정의하며 이를 위하여 다음 세가지 오차를 도입한다. 먼저 설계 데이터로부터 정의되는 익형을 설계익형(designed airfoil profile), 측정데이터로부터 형성되는 익형을 측정익형(measured airfoil profile)으로 부르기로 한다.

- 1) 축오차(axis error, e_{Ax}): 측정 익형 중심과 설계 익형 중심 간의 차로 정의한다.
- 2) 뒤틀림오차(twist error, e_{TW}): 측정익형의 코드선(chord line)과 설계익형의 코드선이 이루는 각도로 정의한다.
- 3) 익형오차(airfoil error, e_{Af}): 측정 익형과 설계 익형 사이의 오차로서 각 익형 상의 대응되는 점 간의 오차(e_i)의 합으로 정의한다.

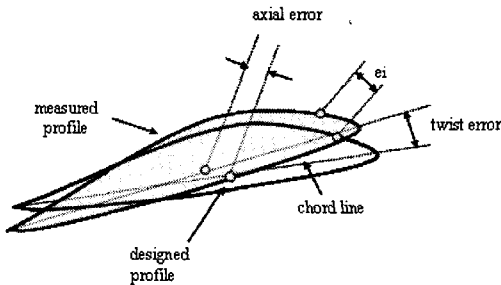


Fig. 3 Three types of error

축오차와 뒤틀림 오차는 각 단면 별로 실제 형상의 중심과 뒤틀림 정도가 설계 형상에 대하여 얼마만큼 오차가 있는가를 측정하기 위한 것이고 익형오차는 두 익형간의 오차가 존재하는지를 판별하

기 위한 것으로서 두 익형간의 오차가 없는 경우 축오차, 뒤틀림오차, 익형오차의 값은 모두 0의 값을 가진다.

2.3 대형 축류팬 측정을 위한 3차원 측정기

대형 축류팬의 측정을 위해 개발된 3차원 측정장치는 기본적으로 비접촉식 레이저 센서를 이용하는 CMM과 유사하다. 단 저가형 시스템으로 구축하기 위하여 Fig.4와 같이 측정장치의 몸체는 알루미늄 프로파일을 이용하고, 이송장치는 볼스크류, 구동부는 스테핑 모터, 측정센서로는 비접촉식 레이저를 사용하며 MMC(Multi Motion Controller) 보드를 통하여 PC에서 각 축의 동작 제어 및 측정 데이터의 입력을 처리한다.

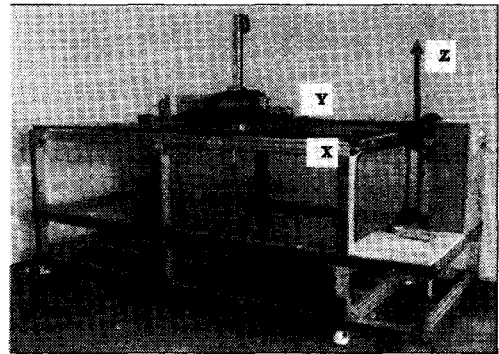


Fig. 4 Three dimensional measuring machine

3차원 측정기 제어 S/W는 두가지 모드(자동 측정, 수동측정)를 선택할 수 있으며 자동측정 모드에서는 사용자가 측정 범위와 측정간격, 측정방향, 측정속도 등을 설정하면 자동으로 피측정물을 스캔하여 3차원 위치정보를 읽어 들인다(Fig. 5). 사용된 레이저 센서의 사양이 측정거리 100mm에 측정범위가 ± 40 mm이기 때문에 레이저는 피측정물인 축류팬에 항상 100mm 측정거리를 유지하면서 스캔한다. 수동조작 모드는 측정기의 각 축을 PC에서 수동으로 조작하여 피측정물의 임의의 위치에서 3차원 위치정보를 획득할 수 있는 기능이다. 측정이 완료되면 측정된 위치정보를 이용하여 3차원 형상을 디스플레이하고 x,y,z 위치정보를 텍스트 파일 형태로 저장한다.

2.4 축류팬 3차원 측정 방법 및 문제점

제작된 측정기를 이용하여 축류팬을 측정하는

방법은 먼저 팬의 중심축을 Fig. 4의 측정기의 y축과 평행하게 위치시킨 다음 Fig. 6과 같이 x축 방향을 따라서 일정간격으로 스캐닝한다. 축류팬의 상면(upper side)를 먼저 측정한 후 측정물을 180도 회전하여 하면(lower side)을 측정한다.

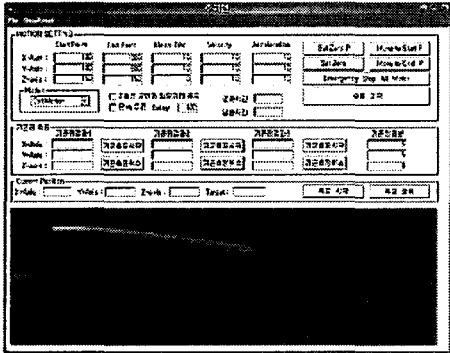


Fig. 5 Measuring machine control S/W

그러나 레이저센서를 사용하여 축류팬을 측정할 경우 각 익형의 리딩 엣지와 꼬리부위에는 표면이 거칠고 날카로운 부분이 많아 Fig. 7과 같이 센서에서 조사된 레이저가 난반사를 일으켜 불량 데이터들이 취득되는 경우가 많이 발생한다. 따라서 이러한 불량 측정 데이터를 제거하고 신뢰할 수 있는 측정데이터만 추출하여 형상 정밀도 분석에 사용하는 전처리과정이 필요하다.

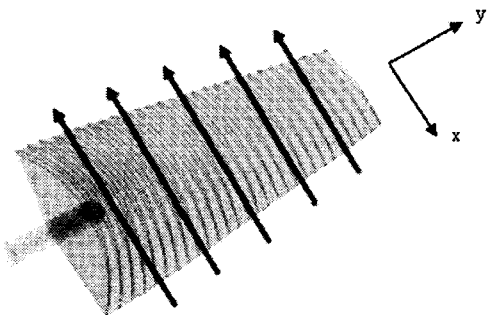


Fig. 6 Scanning direction

3. 형상 정밀도 측정을 위한 데이터 해석

3.1 설계 데이터와 측정데이터

만약 측정으로 취득된 데이터에 문제가 없고

측정 익형 데이터에 대응되는 설계 익형 데이터가 존재할 경우 2.2절에서 정의한 축오차, 뒤틀림오차, 익형오차 등을 계산하는 것이 상대적으로 간단하다. 즉 측정데이터를 이용하여 측정 익형을 생성하고 이로부터 코드라인, 중심점 등을 계산하면 축오차, 뒤틀림오차, 익형오차를 간단히 계산할 수 있다. 그러나 실제로는 다음의 두가지 중요한 문제로 직접적인 비교가 불가능하다.

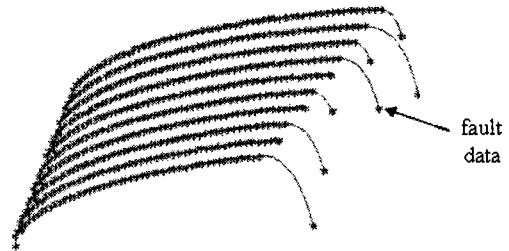


Fig. 7 Faults in measurement

먼저 앞서 언급한 바와 같이 레이저 센서를 사용할 경우 익형의 양쪽 말단 부위의 정보가 누락된 부분적인 위치 정보만 취득된다. 즉 부분적인 측정데이터만으로는 정확한 측정 익형을 계산하기 어렵기 때문에 코드선 및 익형의 중심을 쉽게 알아낼 수가 없다.

두 번째는 측정데이터와 설계데이터의 불일치 문제로서 측정 익형은 y축에 수직인 x축 방향을 따라 스캐닝되는 데 반해 설계 익형은 2.1절에서 설명한 바와 같이 동심원 상에서 정의됨으로서 두 익형간의 직접적인 비교가 불가능하다(Fig. 8). 따라서 측정데이터와 설계데이터를 비교하기 위해서는 기존의 설계데이터를 이용하여 측정데이터에 대응되는 단면 정보를 따로 계산하는 것이 필요하며 자세한 과정은 다음 절에서 설명한다.

3.2 데이터 해석 절차

앞서 언급한 본 연구의 수행에 따른 두가지 문제점을 고려하여 본 연구에서 개발한 축류팬의 측정 및 형상 정밀도를 계산하는 절차는 다음과 같다.

- 1) y축을 따라 단면을 스캔할 위치를 설정한다.
- 2) 축류팬의 상면을 먼저 스캐닝한 후 180도 회전하여 하면을 스캐닝하여 각 단면 별로 상연 하연의 측정 데이터를 취득한다.
- 3) 측정데이터에서 양쪽 끝단 부위의 불량 측정

- 점을 제거한다.
- 4) 팬 설계데이터를 이용하여 팬의 3차원 형상을 모델링한 후 스캔 위치에 해당하는 곳에 2차원 단면을 설정하여 y축에 수직한 익형 데이터를 계산한다.
 - 5) 상연, 하연 측정점을 각각 스플라인 곡선으로 보간(spline curve interpolation)한 뒤, 각 곡선에서 등간격의 n 개의 샘플링 점을 추출한다.
 - 6) 상연, 하연의 각 샘플링 점을 연결하는 직선을 생성하고 설계 익형과의 교점을 통해 익형 오차를 계산한다.(Fig. 9)
 - 7) 설계 익형의 중심점을 이동 및 회전을 반복하면서 익형 오차가 최소가 되는 위치 및 자세를 계산한다. 초기 및 최종 중심점의 위치간의 차이를 축오차, 초기 및 최종 익형의 자세간의 차를 비틀림 오차로 한다.
 - 8) 4)-7)의 과정을 각 단면에 대하여 계산하여 팬 전체의 형상 정밀도를 계산한다.

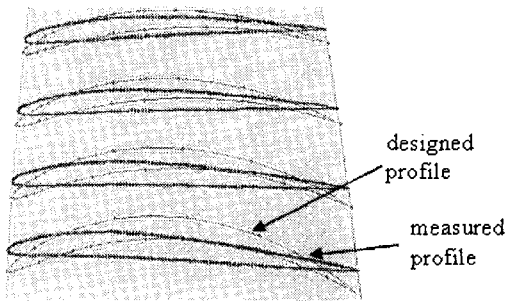


Fig. 8 Deviation between the designed and measured surface profiles of airfoil

위 절차 중에서 4)의 단계가 측정 데이터와 설계 데이터의 불일치를 해결하는 방법이다. 즉 설계 데이터를 이용하여 팬의 3차원 형상을 생성시킨 후 측정데이터의 스캔 위치에 2차원 단면으로 절단(intersection)하여 중심축에 수직한 익형의 위치 좌표를 추출함으로써 측정 데이터와 설계 데이터의 직접적인 비교가 가능하도록 한다.(Fig. 10 참조)

5)-6)의 단계는 불량 측정으로 획득된 익형 전체가 아닌 부분적인 측정 데이터를 이용하여 익형 오차를 계산하는 과정을 보여준다. 먼저 측정 데이터를 연결하는 스플라인 곡선으로 생성되는 불완전한 측정 익형의 상·하연 곡선을 n 등분 한다. 상연 곡선 상의 점을 $p_i^u, i \in [1:n]$ 라 하고 하

연 곡선 상의 점을 $p_i^l, i \in [1:n]$ 라 한다. 이 때 익형 오차(e_{AF})는 p_i^u, p_i^l 을 연결하는 직선과 설계 익형과의 교점간의 거리 e_i^u, e_i^l 의 합으로 정의한다.

$$e^{AF} = \sum_i^n (e_i^u + e_i^l) \quad (1)$$

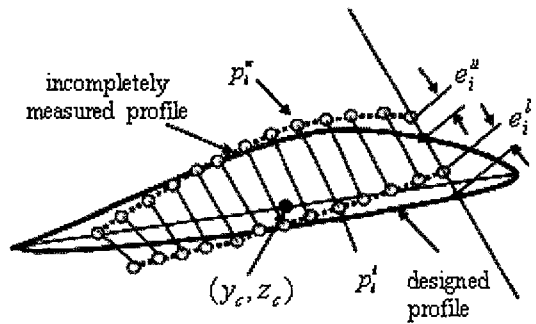


Fig. 9 Airfoil error

여기서 유의할 것은 2.2절에서 언급한 바와 같이 익형 오차는 그 자체의 엄격한 의미보다 설계 익형과 측정 익형간의 오차 여부를 판별하기 위한 것으로서 오차가 클 경우 큰 값을 가지고 오차가 작아짐에 따라 그 값이 작아지는 것을 주요한 속성으로 한다. 따라서 식(1)의 익형오차는 본 연구에서와 같이 측정 데이터가 불균일하게 입력되는 경우에도 상기의 성질을 항상 만족시켜 준다.

마지막으로 7)단계는 설계익형과 측정익형의 일치도를 통하여 축오차 및 회전오차를 계산하는 과정이다. 즉 설계익형의 중심을 회전 및 이동을 통하여 두 익형간의 오차인 익형오차 e_{AF} 가 최소가 되는 조건을 탐색한다. 그러나 이를 위해서는 무수히 많은 회전과 이동을 통한 탐색을 수행하여야하므로 본 연구에서는 방대한 계산량을 줄이기 위하여 최적화기법 중의 하나인 유전자 알고리즘을 도입한다¹².

3.3 유전자 알고리즘을 이용한 익형오차 최소화

유전자 알고리즘은 자연계의 적자생존 법칙을 응용한 탐색 알고리즘으로서 초기에 생성된 모집단이 여러 세대를 거치면서 우수한 개체의 교배와 돌연변이 출현 등을 통해 원하는 최적해를 가지는 개체를 찾아가는 방식이다.

유전자 알고리즘의 제1단계인 초기 모집단을 생성함에 필요한 각 개체의 특성을 나타내는 파라미터는 최적 위치값을 계산해야할 설계 익형 중심좌표(y_c, z_c)와 비틀림 각도 θ 로 한다. 유전자 알고리즘의 전개를 위하여 이 3개의 파라미터를 2진 문자열로 부호화하여 다음과 같이 개체의 염색체(chromosome)로 표현한다.

익형중심점의 y좌표 : y_c										
0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
익형중심점의 z좌표 : z_c										
1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1
회전각도 : θ										
1	0	0	1	0	1	1				

Fig. 10 Chromosomes of y_c, z_c, θ

다음으로 Fig.11과 같은 일반적인 유전자 알고리즘의 절차를 따라 각 파라미터 값을 여러 세대를 거쳐 복제(reproduce), 교배(crossover), 돌연변이 생성(mutate)을 반복하면서 익형오차의 값이 최소화되는 최적 개체를 찾아 나간다. 유전자 알고리즘의 반복은 익형오차의 값이 원하는 값 이내에 들거나 세대수가 설정한 횟수에 도달할 때 종료된다.

최적해가 찾아지면 초기 중심점의 위치(y_c, z_c)와 계산된 최종 중심점의 위치(y_c^*, z_c^*)간의 차이가 축오차 e_{AX} 가 되고 초기 비틀림각(θ)와 최종 비틀림(θ)의 차가 비틀림 오차 e_{TW} 가 된다.

$$e_{AX} = (y_c^*, z_c^*) - (y_c, z_c) \quad (2)$$

$$e_{TW} = (\theta - \theta) \quad (3)$$

4. 구현 예

본 연구에서 개발된 축류팬 형상 정밀도를 측정하기 위한 방법은 상용 솔리드 모델러인 UG ver.16 및 UG-API와 Visual C++ 6.0을 이용하여 Pentium V 상에서 구현되었다. API를 이용할 경우 본 연구에서 요구되는 축류팬의 3차원 형상 모델링, 스플라인 곡선, 곡선의 등간격 샘플링점 생성, 직선과 스플라인 곡선의 교점 등의 계산이 솔리드 모델러

에 의존하기 때문에 매우 용이하게 된다.

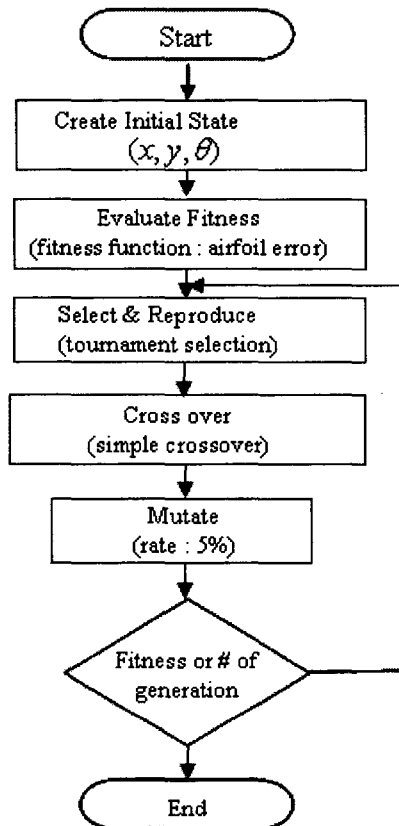


Fig. 11-1 Procedure of genetic algorithm

개발된 방법론은 반경 1,280mm의 냉각탑용 축류팬에 대하여 적용되었다. 축류팬의 y축 방향으로 7개 구간을 스캐닝하고 측정 데이터를 취득하였다. Fig.11은 측정데이터와 비교하기 위하여 설계 데이터를 이용하여 만든 3차원 형상으로부터 2차원 단면 정보를 추출하는 모습이다.

Fig. 12는 측정 데이터로 만든 측정 익형과 설계 익형을 비교한 모습이다. 익형의 선단부와 말단부에서 측정불량으로 데이터가 취득되지 못한 것과 형상의 뒤틀림으로 측정데이터와 설계데이터의 차이가 발생함을 확인할 수 있다.

각 구간별로 측정데이터와 설계데이터의 모습이 Fig. 13에 나타나 있다. 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 과정은 개체 모집단의 크기를 300개체, 교

차율은 80%로 하였으며 나머지 개체는 그대로 복제되어 다음 세대로 넘어가도록 하였다. 그리고 돌연변이 발생률은 5%로하고 1,000세대가 되면 종료되도록 하였다. 교차연산자로는 2점 교차를 선택하였으며 돌연변이는 염색체 각 비트의 0과 1을 역으로 바꾸어 생성되도록 하였다.

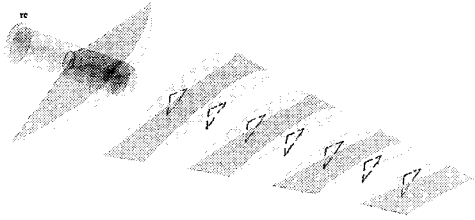


Fig. 11-2 Intersection of an axial fan with planes

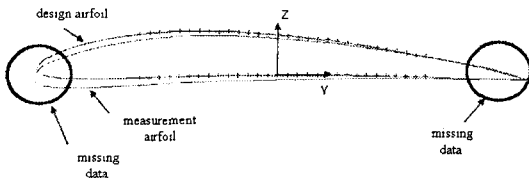


Fig. 12 Design and measurement data

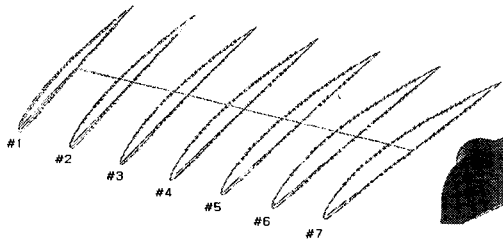


Fig. 13 Distortion in each section

Table 1에 각 구간별로 축오차와 뒤틀림 오차가 나타나 있다. 최적화 계산은 각 구간별로 실시되었으며 6번째 구간과 7번째 측정구간은 익형오차의 크기가 오차한계 내에 존재하여 측정 형상에 변함이 없는 것으로 판단하였다. 익형오차를 계산하기 위한 샘플링 점의 개수를 15로 하였으며 유

전자 알고리즘을 이용한 최적화과정에는 약 10여분이 소요되었다.

Table 1 Axis error and twist error

section no.	axis error(mm)		twist error(degree)
	y-axis	z-axis	
1	-6.2	-38.6	2.40
2	-7.9	-24.3	1.19
3	-2.6	-12.1	0.60
4	-1.1	-4.0	0.06
5	-0.9	-1.2	0.01
6	0	0	0
7	0	0	0

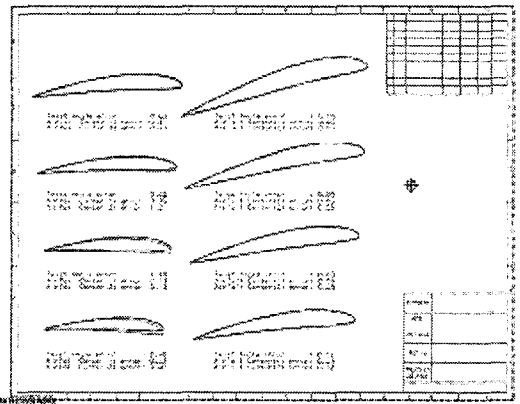


Fig. 14 Fan errors displayed in a 2-D drawing

Fig. 14는 축류팬의 뒤틀림 양을 사용자가 쉽게 알아볼 수 있도록 각 단면별 오차의 크기를 2차원 도면으로 출력한 모습이다. 도면의 척도는 단면 사이즈와 용지사이즈에 의해 자동으로 설정되며 각 단면 형상 하단에 Table 1에서 계산된 각 측정 구간별 변형량이 자동으로 삽입되도록 하였다.

5. 결론

본 연구에서는 냉각탑용 축류팬의 형상 정밀도를 측정하는 전용 측정시스템을 개발하였다. 개발된 2,000mm×1,500mm×1,000mm 측정 범위를 갖는 3차원 측정기는 몸체를 알미늄 프로파일을 사용하였고, 이송장치는 볼스크류, 구동부는 스테핑

모터, 측정센서로는 비접촉식 레이저센서를 사용하였다. 본 연구에서 개발된 3차원 측정기는 총 제작비가 상용 CMM의 1/10 수준인 2,000만원 정도 소요되었으며 이는 냉각탑을 생산하는 중소기업에서 충분히 도입할 수 있는 수준이라 생각된다.

개발된 정밀도 계산을 위한 데이터 방법론을 솔리드 모델러인 UG 상에 구현함으로써 기존의 팬 설계 및 자동 모델링과 쉽게 연동될 수 있도록 하였다. 그러나 이러한 접근 방법은 구현의 용이성이 보장되는 반면 특정 솔리드 모델러 의존성이 크기 때문에 향후 독립적인 시스템으로 개발하는 것이 요구된다. 또한 측정범위를 넘어서는 대형 축류팬을 측정할 경우를 위하여 측정 범위를 고려한 분할 측정 및 측정 데이터의 합성에 대한 방법론을 보장하는 것이 추후 필요하다.

후 기

본 연구는 2004년 경남대학교 학술논문게제 연구비 지원으로 이루어졌음

참고문헌

1. Kang, J. G., Lee, H. S., Oh, K. J. and Jung, J. Y., "Optimal Design and Die Manufacturing of an Axial Fan for Cooling Towers," IE Interfaces, Vol. 13, No. 4, pp. 717-724, 2000.
2. Kang, J. G., Lee, K. I, Kim, W. I. and Lee, Y. K., "An Automated Design and 3-D Modeling System of Axial Fans and a Boss," Trans. of Korean Society of Machine and Tool Engineers, Vol. 12, No. 1, pp. 50-57, 2003.
3. Choi, D. K., Choi, W. S. and Park, S. K., "Development of an axial flow fan for a refrigerator by in-house design system," Journal of Korean CAD/CAM, Vol.2, No.2, pp. 85-92, 1997.
4. Park, S. K. and Choi, D. K., "Integrated Process for Development of an Optimal Axial Flow Fan(Design, RP, Measurement, Injection Molding, Assembly)," Korean CAD/CAM, Vol.3, No.3, pp. 201-209, 1998.
5. Hwang, J. D., Jung, J. Y. and Jung, Y. G., "A study on Application of Reverse Engineering for Technical Surfaces," Proc. of Korean Society of Machine and Tool Engineers Spring Conference 2002, pp.319-324, 2002.
6. Chen, L. C. and Lin, G. C. I., "An integrated reverse engineering approach to reconstructing free-form surfaces," CIMS, Vol. 10, pp. 49-60, 1997.
7. Varady, T., "Reverse engineering of geometric models - an introduction," Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 4, pp.255-268, 1997.
8. Kang, J. W. and Byu, J. H., "Fitting Method of Airfoil Edge Using CMM," IE Interface, Vol.13, No.4, pp.703~708, 2000.
9. 3D Measurement of Water Turbines, <http://www.topomatika.hr/Applications/turbine-en.htm>.
10. Hur, S. M., Choi, J. W. and Lee, S. H., "Study on Application of Reverse Engineering by Generation of the Free-Form Surface," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 10, pp.168-177, 2001
11. Kim, Y. S., Lee, H. K., Huang, J. C., Kong, Y. S. and Yang, G. E., "A Study on Improvement of Accuracy using Geometry Information in Reverse Engineering of Injection Molding Parts," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 10, pp.99-106, 2002
12. Wallis, R. A., "Axial Flow Fans and Ducts," John Willey & Sons Inc, 1983.
13. Goldberg, D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley, 1989.