

# 접촉식 3차원 형상스캐너를 이용한 터빈 블레이드의 형상 정밀도 측정

강병수<sup>+</sup>, 강재관\*

(논문접수일 2006. 7. 25, 심사완료일 2006. 8. 30)

## Profile Error Measurement of a Turbine Blade Using a Contact Type 3D-Scanner

Byung-Su Kang<sup>+</sup>, Jae-Gwan Kang\*

### Abstract

In this paper, profile error measurement method of a turbine blade using 3D-scanner is developed. The method begins with scanning the upper and lower sides of the blade on which three small balls are attached, and constructs a solid measurement model by registering the two scanned surfaces. Airfoils are derived from the model at each interval by intersecting it with a plane, and arranged with design airfoils. The  $2^2$  factorial design search method is engaged in arranging the two airfoils, from which the main blade parameters including the edge radius are computed. The developed measurement technique is applied to practical blade manufacturing and validates its effectiveness.

**Key Words** : 3-D Scanner(3차원 스캐너), CMM(3차원 측정기), Turbine Blade(터빈 블레이드), Reverse Engineering(역공학), Profile Error(형상 오차)

## 1. 서론

터빈발전기의 핵심 부품인 블레이드는 2천도 이상의 고온 고압에서 연소된 공기를 회전력으로 바꾸는 역할을 하는 부품으로 고온·고속회전에 견딜 수 있도록 설계되어 있다. 터빈블레이드 제조공정에서 가공오차가 발생하거나 변형이 생길 경우 블레이드 사이에 밸런스가 깨지면서 소음, 진동이

발생하고 심할 경우 블레이드가 다른 장치와 충돌하여 파손되는 사태로 연결되기도 한다. 따라서 블레이드 형상을 가공공정의 중간 또는 조립 전 단계에서 형상 정밀도를 측정하는 것이 매우 중요하다.

그러나 터빈 블레이드의 형상은 단면이 90도 가까이 꼬여 있기 때문에 측정이 용이하지 않으며 날카로운 에지 부위에서 측정 데이터의 유실이 자주 발생한다. 또한 기준점을 설

\* 경남대학교 기계자동화공학과 (jkkang@kyungnam.ac.kr)  
주소: 631-701 경상남도 마산시 월영2동 449  
+ 경남대학교 대학원 기계공학과

정하기가 어렵기 때문에 측정 후 상·하면의 정합이 용이하지 않는 등 측정 및 데이터분석에 많은 어려움이 따른다. 이외에도 측정데이터를 이용하여 곡면의 구성 및 모델링된 곡면으로부터 품질 검사에 필요한 치수를 추출할 수 있는 방법론의 개발이 필요하다.

터빈 블레이드의 형상 정밀도 측정과 관련된 기존의 여러 연구들<sup>(1-4)</sup> 중 Park<sup>(1)</sup>은 6점의 측정데이터에 기초한 대략정렬 및 곡선부 반복측정과 최소자승법을 적용한 정밀정렬의 방법을 사용하였으며 윤곽도 오차해석을 위하여 분할기술로 측정점의 위치 좌표와 법선벡터를 구하고 최소영역법에 근사한 윤곽도 근사를 얻기 위하여 체비셰프 놈(norm)을 반복적으로 수행하였다. Kang<sup>(2)</sup>은 3차원 측정기를 이용하여 터빈 블레이드를 측정할 때 에어포일 에지 부위의 측정오차를 최소화하는 방법을 연구하였으며 Jung<sup>(3)</sup>은 터빈블레이드 측정시 탐침 볼의 직경을 선정하는 방법을 제시하였다.

그러나 기존의 연구들에서는 현장에 널리 사용되는 3차원 측정기(CMM)를 이용하였으나 터빈 블레이드와 같은 자유곡면(free-form) 형상의 경우 공간상의 점(point)을 여러 번 측정하는 3차원 측정기보다 곡면을 연속적으로 측정할 수 있는 형상 스캐너를 사용하는 것이 효율적이다. 또한 측정데이터의 처리에 있어서도 CAD/CAM S/W의 발전에 따라 상용 스캔데이터 처리 전용 S/W를 이용하는 것이 일반화되고 있다. 즉 스캔데이터 처리 전용 S/W를 이용할 경우 Park<sup>(1)</sup>의 연구에서 논의된 스캔 데이터를 이용하여 블레이드의 곡면을 모델링하는 부담을 생략할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구와 달리 역공학(reverse engineering)에서 많이 활용되는 첨단 장비인 3차원 스캐너와 스캔 데이터 처리 S/W를 이용하여 터빈 블레이드 형상을 측정하고 품질 검사에 필요한 측정 데이터를 추출하는 정형화된 방법을 제시한다. 특히 품질 검사에 필요한 검사 치수를 알아내기 위하여 최적화 기법을 이용한 에어포일의 정렬 방법 및 에어포일 에지(edge) 반경 치수를 포함한 검사 데이터를 추출할 수 있는 구체적인 계산 방법을 제시한다.

## 2. 블레이드 에어포일의 형상과 규격

### 2.1 에어포일 형상과 규격

터빈 블레이드는 Fig. 1에서와 같이 공기 흐름 방향으로 airfoil fairing에 의한 곡면과 공기흐름 수직방향으로 spanwise fairing에 의한 곡면, 그리고 블레이드의 기준이 되는 base block으로 이루어진다<sup>(1)</sup>.

블레이드의 단면인 에어포일(airfoil) 곡선들은 모멘텀의 기준점인 스택킹 점(stacking point)을 중심으로 하여 스패 방향으로 쌓아 올려져 있다. 그리고 각 에어포일 곡선은 크게 압력면(pressure surface), 흡입면(suction surface), 리딩 에지(leading edge), 트레일링(trailing edge), 중심선(mean line)등의 주요 요소로 정의 된다. 압력면과 흡입면은 3차원 곡선으로 모델링 되어있고, 리딩에지와 트레일링 에지는 블레이드 설계시 요구되는 균일한 공기 압축력과 공기 저항을 최소화하기 위해서 Fig. 2와 같이 원(circle)형상을 가지고 있다.

그러므로 블레이드의 품질검사에서는 블레이드의 효율과 양력 발생에 직접적으로 관련이 있는 압력면과 흡입면의 윤곽도 오차와 곡률변화가 가장 심한 리딩에지와 트레일링 에지의 형상오차에 대해 검사를 하는 것이 일반적이다<sup>(1)</sup>. 이외

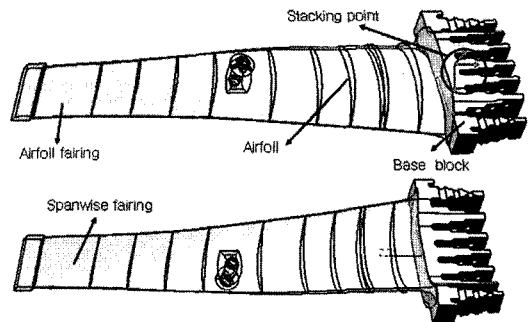


Fig. 1 Turbine blade

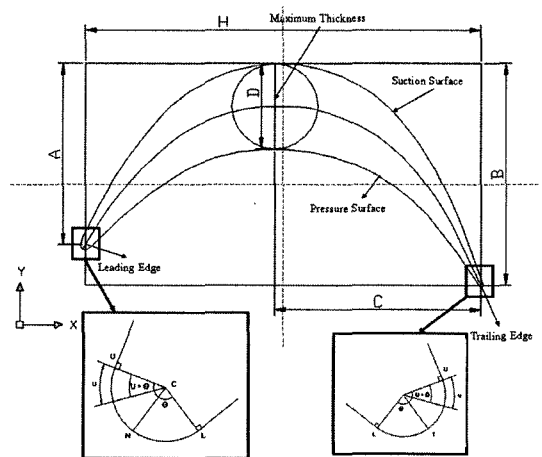


Fig. 2 Principal parameters of a turbine blade

에도 현장에서는 각 제조공정 과정에서의 공정중 검사(in-process inspection)을 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같은 주요 치수(A, B, C, D, H)에 대한 검사를 병행한다. 이는 각 공정에서 블레이드의 정확한 형상측정을 하는 것이 쉽지 않기 때문에 중간공정에서 간단하게 가공 정밀도를 확인하기 위한 치수로 이용된다<sup>(4)</sup>.

### 2.2 접촉식 3차원 형상 스캐너

본 연구에서 사용한 접촉식 3차원 형상스캐너는 Renishaw사의 Cyclone이다. 측정 영역은 600mm x 500mm x 400mm로 본 연구의 대상인 800mm 사이즈의 터빈 블레이드의 직접 측정은 불가능하다. 특히 상면과 하면을 회전시키기 위한 인덱싱(indexing) 장치를 형상 스캐너 테이블 위에 설치할 경우에는 측정 가능 영역이 더욱 좁아지게 된다.

따라서 본 연구에서는 1m 이상의 대형 터빈 블레이드 형상도 측정 가능한 장치를 개발하여 부착하였다. 부가장치는 Fig. 3과 같이 측정기의 테이블과 동일한 높이를 갖는 정반으로 구성된 보조 테이블을 제작하고 인덱싱 장치인 연동척(scroll chuck)과 X축 방향으로 이송이 가능한 LM가이드로 구성되어 있다.

3차원 형상 스캐너를 사용할 경우에는 먼저 측정하고자 하는 범위 및 프로브의 스텝오버(step over)와 노말피치(normal pitch)를 지정해주면, 자동으로 전체 형상의 측정을 수행하고, 형상측정 완료 후에는 프로브 반경을 자동으로 보정하여 측정결과를 저장하게 된다.

### 3. 설계형상과 측정형상의 비교

서론에서 언급한 바와 같이 터빈 블레이드와 같이 단면이 90도 가까이 꼬여있는 경우 측정 및 데이터해석에 여러 가

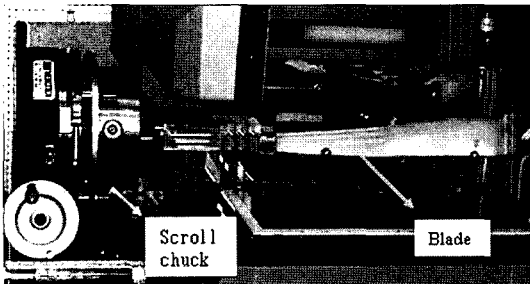


Fig. 3 Turbine blade measurement system with a 3D scanner

지 어려움이 따른다. 본 연구에서 사용한 측정 방법 및 측정 데이터 해석의 전체적인 과정이 Fig. 4에 나타나 있다.

### 3.1 터빈블레이드 형상 측정

장착된 터빈 블레이드의 상면을 먼저 측정하고 인덱싱 장치를 이용하여 180도 회전시킨 후 하면을 측정한다. 터빈 블레이드의 경우 형상에 기준점을 설정하는 것이 용이하지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 상·하면 측정 데이터의 정합에 필요한 기준점 설정을 위하여 3개의 작은 구(sphere)를 블레이드의 모서리 부위에 부착을 하였다. 공간상의 3개의 점은 하나의 평면을 정의하기 때문에 상·하면에서 각각 스캔된 반구의 중심을 서로 일치시키면 상·하면이 정합된 형상을 쉽게 얻을 수 있다.

상·하면 측정 데이터의 정합에는 스캔데이터 처리 상용 S/W인 Rapidform의 데이터기반정합(Datum Based Register) 기능을 사용하였다. 이 방법은 평면, 벡터, 기준점등을 이용하여 정렬하는 방법으로, 설계나 가공시의 기준면이나 기준 좌표계가 있는 경우에 사용한다. Fig. 5는 3차원 스캐너를 이용하여 상·하면을 각각 측정한 모습이고 Fig. 6은 미리 부착한 3개의 구의 중심을 기준으로 정합을 끝낸 모습이다.

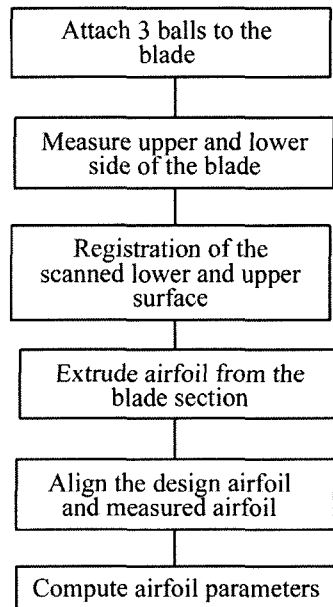


Fig. 4 Measurement and data analysis procedures of a turbine blade

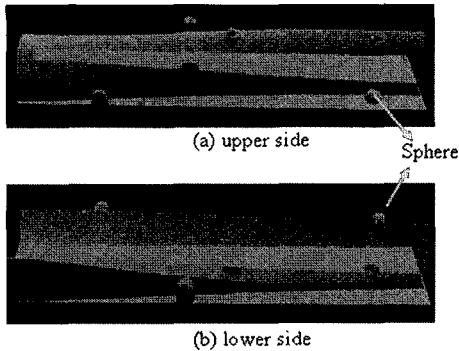


Fig. 5 Scanning of upper and lower blade sides

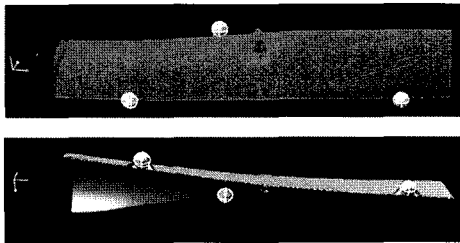


Fig. 6 Registration of upper and lower scanning data

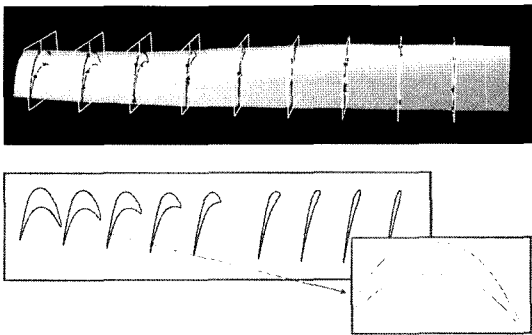


Fig. 7 Airfoil curve of each section of a blade

### 3.2 측정 형상으로부터 단면별 에어포일 추출

3.1절에서 계산된 측정 블레이드 형상으로부터 구간별 에어포일을 추출하기 위해서 블레이드의 모멘텀의 기준점인 스테킹 포인트를 중심으로 설계 도면에 나타나 있는 구간별로 평면을 생성하고 이 평면을 이용하여 블레이드 형상을 절단하였다. Fig. 7에 곡면의 절단 과정과 추출된 에어포일의 형상 곡선이 나타나 있다.

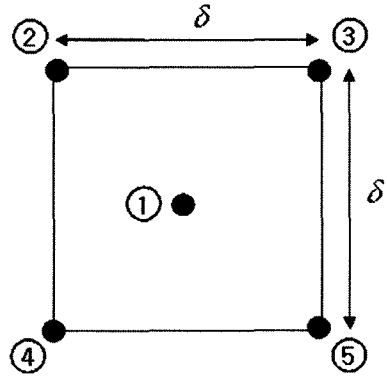


Fig. 8 Test points in  $2^2$  factorial design

### 3.3 설계 에어포일과 측정 에어포일의 정렬

본 연구의 목표인 측정데이터로부터 Fig. 2에서 정의한 각 에어포일의 파라미터 값을 계산하기 위해서는 우선 설계 에어포일과 측정 에어포일간의 편차가 최소가 되도록 정렬하는 것이 필요하다. 즉 Fig. 9에서 보는 바와 같이 편차를 가지고 위치해 있는 두 에어포일을 최소 편차가 되도록 위치시키는 것이 정렬(arrangement)이다. 정렬이 되어야 설계 에어포일의 기준 점을 이용하여 원하는 측정 에어포일의 윤곽도 오차와 두 에지의 형상오차를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 두 에어포일간의 오차를 최소화하는 정렬의 방법으로서 요인배치법을 이용하였다<sup>(2,3)</sup>. 요인배치법은 최적의 해를 찾기 위하여 Fig. 8과 같이 현 위치(①)값과 네 방향(②,③,④,⑤)에서의 위치값을 평가하여 탐색방향을 결정하는 방법이다. 요인배치법을 이용하여 설계 에어포일 곡선과 측정 에어포일 곡선 간의 오차가 최소가 되는 위치를 탐색하는 절차는 설계 에어포일 중심점에 Fig. 8과 같은 정사각형 실험영역( $\delta$ )을 설정하고 실험점 ②, ③, ④, ⑤를 중심점으로 하여 두 에어포일간의 편차를 계산한다. 이 때 두 에어포일간의 편차는 Fig. 9에서 나타난 에어포일을 구성하는 스플라인 곡선을 일정한 개수로 분할한 후 분할 점들 사이의 거리 값의 합으로 정의하였다.

탐색은 편차값이 최소인 방향으로 움직이되 만약 편차가 중앙 점에서 최소가 될 때는 작업영역을 반으로 줄이면서 탐색을 수행하다 정사각형의 크기가 측정기 오차보다 작아질 때 탐색을 중지한다. Fig. 10에 정렬 전(Fig. 10 (a))과 후(Fig. 10 (b))의 설계 데이터와 측정데이터의 모습이 나타나 있다. 정렬 전에 두 에어포일 간의 총 편차 합이 3.54에서 정렬 후에는 0.28으로 줄어 든 것을 확인할 수 있었다.

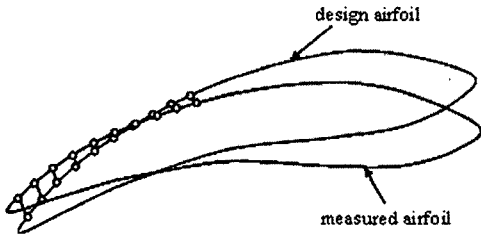


Fig. 9 Deviation between design and measured airfoils

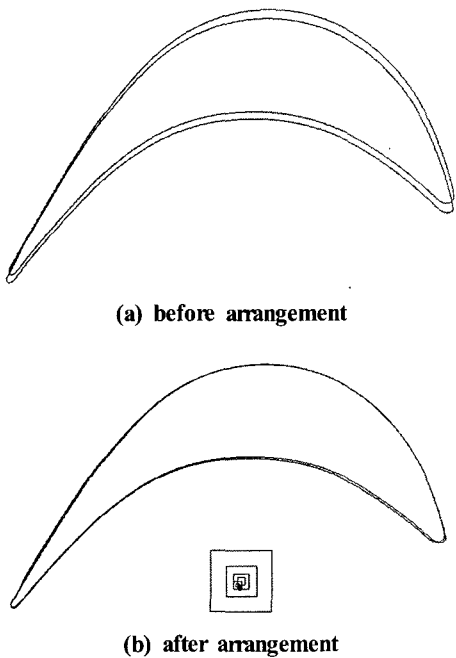


Fig. 10 Arrangement of two airfoils

### 3.4 리딩 에지와 트레일링 에지의 형상 오차

에어포일의 리딩에지와 트레일링 에지의 형상은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 에어포일 중심선(mean line)의 끝점에 접하는 원의 반경 값으로 정의된다. 측정 데이터로부터 이 반경 값을 계산하기 위해서는 측정데이터로부터 에지를 정의하는 원(circle)의 추정에 사용할 데이터를 구분하는 과정이 필요하다. 4.4절에서 두 에어포일의 편차값이 최소가 되도록 정렬하는 과정은 이를 위해 필요하다. 즉 Fig. 11과 같이 설계 에어포일 에지의 반경 영역에 속하는 측정데이터로부터 반경 값을 계산한다.

측정점으로부터 원의 반경을 보간하는 방법으로는 최소자승법(Least Square Method)을 이용한다. Fig. 12에 임의

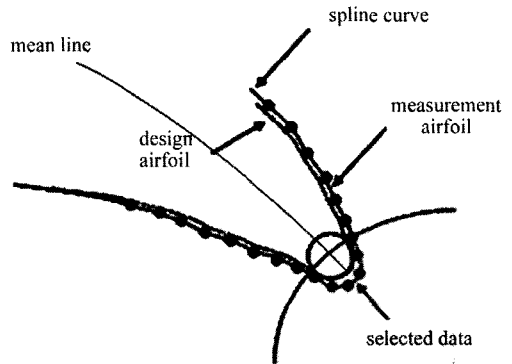


Fig. 11 Separation of the measurement data

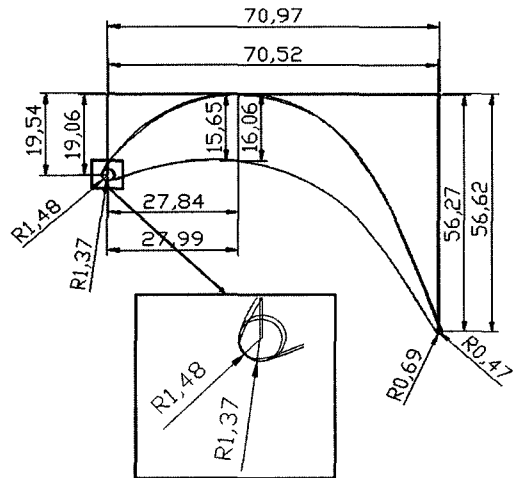


Fig. 12 Circle fitting of the leading edge

의 에어포일에 대하여 Fig. 2에서 정의된 리딩 및 트레일링 에지의 반경(L\_R, T\_R) 및 에어포일을 구성하는 파라미터(A,B,C,D,H)를 측정데이터로 계산한 모습이 나타나 있다.

### 3.5 측정 결과

앞 절에서 제시한 방법에 의하여 블레이드의 측정구간별 특징형상의 치수를 계산한 결과를 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용한 블레이드의 경우 허용공차(+0.76, -0.38)으로서 양의 허용공차(+0.76)가 음의 공차(-0.28)보다 크게 주어지는 것은 잘못 제작되는 경우 사상(polishing)등의 후가공을 통하여 치수를 맞추기 위함이다.

허용공차를 본 연구에서 사용한 가공 블레이드 형상에 적용하였을 때 U 단면에서는 A치수에서, S 단면에서는 A, D,

**Table 1. Parameter values estimated by measured data**

Design Data							
	A	B	C	D	H	L_R	T_R
W1	41.21	50.28	44.11	19.39	88.87	1.04	0.46
U	30.53	53.15	35.94	17.78	80.19	1.49	0.47
S	19.06	56.27	27.84	15.65	70.52	1.48	0.47
P	10.57	60.75	18.48	13.29	60.08	1.56	0.47
M	5.25	65.44	9.19	10.62	49.63	1.99	0.46
G1	71.24	-	34.19	-	-	1.91	0.45
C	73.37	-	25.42	-	-	1.78	0.43

Measured Data							
	A	B	C	D	H	L_R	T_R
W1	40.65	49.67	43.8	19.31	88.93	1.01	0.51
U	30.98	53.4	35.94	18.11	80.51	1.34	0.60
S	19.54	56.62	27.99	16.06	70.97	1.37	0.69
P	10.75	60.97	18.75	13.23	60.61	1.42	0.53
M	4.99	65.39	9.59	10	50.01	2.03	0.55
G1	71.38	-	34.96	-	-	2.22	0.51
C	73.97	-	26.17	-	-	1.78	0.61

H 치수에서, P단면에서는 H치수, 그리고 G1단면에서는 C 치수에서 허용공차를 넘어서는 즉 불량 블레이드로 판정되었다.

### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 3차원 측정기가 아닌 접촉식 3차원 형상 스캐너와 곡면 처리 전용 S/W를 이용하여 직경 800mm 에 이르는 대형 터빈 블레이드의 3차원 형상 정밀도를 측정·평가하는 방법을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 접촉식 3차원 형상스캐너는 3차원 측정기(CMM)과 달리 프로브가 측정 대상물의 접촉하여 일정속도로 이동하면서 3차원 형상의 위치데이터를 연속으로 획득함으로써 더욱 정밀한 터빈 블레이드의 측정이 가능하였으며 비접촉 측정기로는 측정이 용이하지 않은 날카로운 블레이드 에지 부위의 측정도 잘 이루어 짐을 확인할 수 있었다.
- (2) 터빈 블레이드는 특징점을 잡기가 어려워 측정된 블레이드 상하면의 정합이 용이하지 않다. 이를 해결하기 위하여 블레이드 에지에 3개의 구를 부착하여 기준점으로 사용하였으며 정합에는 스캔데이터 처리 전용 S/W의

레이턴 기반 정합 기능을 사용함으로써 정합에 필요한 곡면 처리의 부담을 크게 줄일 수 있었다.

- (3) 각 단면에서의 형상오차를 정밀하게 계산하기 위하여 측정데이터의 단면 에어포일과 설계 에어포일을 정렬하는 단계를 추가하였으며 최적화 방법 중의 하나인 요인배치법을 사용하여 두 단면 정보간의 최적 정렬을 수행하였다.
- (4) 최적 정렬을 수행한 후에 블레이드의 주요 설계 파라미터 및 리딩에지와 트레일링 에지의 반경을 추출하였으며 추출된 치수와 가공 공차를 비교함으로써 가공된 블레이드의 양·부를 판정할 수 있었다.

### 후기

이 논문은 2006년도 경남대학교 학술연구진흥비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

- (1) Park, H. J., Ahn, W. J. and Kim, W. D., 1996, "Development of Precision Inspection Technique for Aircraft Parts Having Very Thin Feature Based on CAD/CAI Integration," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 20, No. 6, pp. 1743~1752.
- (2) Kang, J. N. and Byun, J. H., 2000, "A Study on Fittig the Edge Profile of Airfoil with Coordinate Measuring Machines," *IE interfaces*, Vol. 13, No. 4, pp. 703~708.
- (3) Joung, S. H. and Byun, J. H., 2002, "An Experimental Study on Selecting the Diameter of Probe Stylus of a Coordinate Measuring Machine in Measuring the Edge Profile of High Pressure Compressor," *IE interfaces*, Vol. 15, No. 4, pp. 432~438.
- (4) Hubele, N. F., Montgomery, D. C. and Chih, W. H., 1991, "An Application of Statistical Process Control in Jet-Turbine Engine Component Manufacturing," *Quality Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 197~210.
- (5) Lee, Y. J., 2006, *Personal Communication*, Doosan Heavy Industries & Construction Co.
- (6) Dowling, M. M., Griffin, P. M., Tsui, K. L. and Zhou, C., 1997, "Statistical Issues in Geometric Feature Inspection Using Coordinate Measuring Machines," *Technometrics*, Vol. 39, No. 1, pp. 3~24.