

< 논 문 >

## CAD/CAI 통합에 기초한 박형 단면을 가지는 항공기 터빈 블레이드의 정밀측정기술 개발

박희재\* · 안우정\* · 김왕도\*\*

(1995년 2월 22일 접수)

### Development of Precision Inspection Technique for Aircraft Parts Having Very Thin Features Based on CAD/CAI Integration

H. J. Pahk, W. J. Ahn and W. D. Kim

**Key Words :** Precision Inspection(정밀측정), CMM(3차원측정기), CAD/CAI(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing : 컴퓨터 원용 설계/측정)

#### Abstract

In this paper, a precision inspection technique using CAD/CAI integration is proposed for the parts having very thin and sharp 3 dimensional curve features. The technique begins with feature reconstruction of turbine blades which have 3 dimensional combined geometry, such as splines, and thin circles. The alignment procedures consist of two phases-rough and fine phases: rough phase alignment is based on the conventional 6 points probing on the clear cut surfaces, and fine phase alignment is based on the initial measurement on the 3 dimensional curved parts using an iterative measurement feed-back least squares technique for alignment. For the analysis of profile tolerance of parts, the actual measured points are obtained by finding the closest points on the CAD geometry by the developed subdivision technique and the Tschebycheff norm is applied based on iterative fashion, giving accurate profile tolerance value. The developed inspection technique is applied to practical procedures of blade manufacturing and demonstrated high performance.

#### 1. 서 론

CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)기술의 발전은 제품의 설계와 가공에 있어서 최적화를 추구하는 제조 산업에 혁명적인 영향을 주었다. CAI(Computer Aided Inspection) 기술은 컴퓨터로 제어되는 3차원 측정기(CMM: Coordinate Measuring Machine)의 등장 이후

에 출현하였으며, 가공물에 대한 CAD/CAM 통합에 기초한 CAI 기법에 대한 전임 연구들이 있었다.<sup>(1~3)</sup> Duffie 등<sup>(1)</sup>은 CAD와 연계된 CAI 시스템을 곡면의 측정에 적용시켰으며, Bojanic 등<sup>(2)</sup>은 추론기능을 가지는 지능형 CAD/CAI 시스템을 발표하였고, Menq 등<sup>(3)</sup>은 CAD/CAI 시스템에 있어서 최소자승방법에 기초하여 좌표계 정렬을 수행하는 방법을 소개하였다.

그러나, 터빈 블레이드와 같은 매우 얇고 첨예한 형상을 가지고 있는 제품에 대해서는 컴퓨터로 제어되는 3차원 측정기가 얇은 형상을 측정하는데 있

\*회원, 서울대학교 기계설계학과

\*\*삼성항공산업(주)

어서 실패하는 횟수가 매우 잦았는데, 이는 기존의 좌표계 정렬방법이 좀 더 정밀한 정밀정렬이 되지 못했던 것에 기인한다. 따라서 본 논문에서는, 두 단계의 좌표정렬과정을 통하여 매우 얇고 침예한 형상의 측정을 수행할 수 있는 새로운 기술을 제안한다. 잘 가공된 기준블록면상의 6점의 측정데이터에 기초한 대략정렬(rough alignment), 그리고 곡선부에 대해서 반복측정에 기초한 최소자승법에 의한 정밀정렬(fine alignment)이 제안되었다. 또한 좌표계 정렬을 수행함에 있어서 측정프로브의 반경을 고려하였으며, 반복적인 측정과 아울러 반복적 수치계산에 의하여 좌표계 정밀정렬을 수행하였다. 한편, 측정된 곡선의 윤곽도 오차해석에 있어서 예전에 발표된 알고리즘(e.g. <sup>(7)</sup>)들은 측정된 점의 법선벡터와 위치좌표가 정확하게 주어졌을 경우에만 윤곽도 공차 평가가 가능한 것들이었다. 그러나, 윤곽선 측정시 대부분의 경우에는 실제 측정점의 정확한 위치좌표와 법선벡터를 구하는 것이 거의 불가능하며, 따라서 해석결과의 정밀도가 떨어질 수 밖에 없었다. 따라서, 본 연구에서는 정밀한 윤곽도 오차를 평가할수 있는 개선된 윤곽도 오차 해석방법을 제안한다. 즉, 분할기술(subdivision technique)을 이용하여 실제 측정점의 위치좌표와 법선벡터를 구하고, 체비셰프 놈(Tshebyscheff Norm)을 반복적으로 실행함으로써 ISO<sup>(9)</sup> 등에서 공차계산의 표준으로 추천하고 있는 최소영역법에 근사하는 정확한 윤곽도 공차를 얻을 수 있다.

개발된 측정 시스템은 CAD/CAM 환경하에서 제작되는 블레이드 제작공정에 실제로 적용되어 매우 좋은 결과를 보여주었다. Fig. 1은 터빈 블레이드를 제작하기 위한, 컴퓨터와 ECM(Electro Chemical Machine)의 네트워크를 포함하는 전형적인 CAD/CAM/CAI 통합 시스템을 보여주고 있다.

## 2. 측정을 위한 기하학적 형상 구성

CAD/CAI 통합 시스템을 구현하기 위해서는 먼저 측정을 수행할 블레이드의 기하학적 형상정보를 CAD 데이터베이스로부터 얻는다. 3차원 곡면을 CAD 시스템으로 모델링하는 기법은 여러가지가 있으며, 일반적으로, 터빈 블레이드는 공기흐름방향으로는 에어포일 페어링(airfoil fairing)에 의한 곡선, 공기흐름에 수직방향으로는 스펠방향 페어링(spanwise fairing)에 의한 곡선, 그리고 블레이드의 기준(reference)이 되는 베이스블록(base block)으로 구성되어 있다. 그리고, 에어포일 곡선들은 공기흐름에 의해 생성되는 모멘텀의 기준점

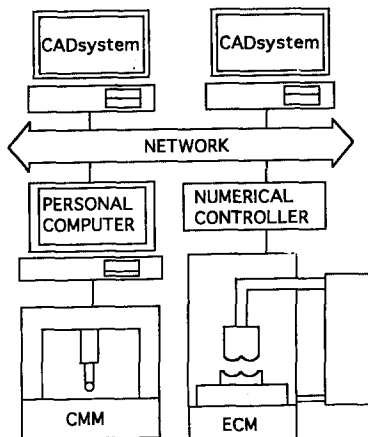


Fig. 1 CAD/CAI integration system around networks of computers and machines

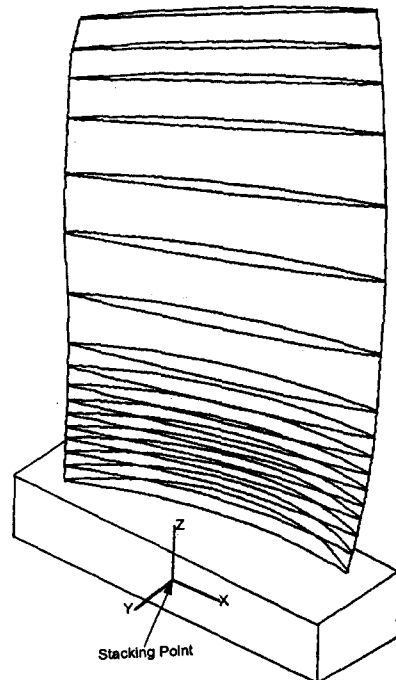


Fig. 2 Therr dimensional representation of a turbine blade

인 스택킹 포인트(stacking point)를 중심으로 하여 스펠방향으로 쌓아 올려져 있다. 터빈 블레이드의 3차원 형상의 대표적인 예가 Fig. 2에 나타나 있다. 각 에어포일 곡선의 상세한 모델링을 Fig. 3(a)에서 보면, 에어포일 곡선은 크게, 압력면(pressure surface), 흡입면(suction surface), 리딩 에지(leading edge), 트레일링 에지(trailing edge) 등의 형상으로 되어 있다. 일반적으로 압력면/흡입면은 3차원 곡선으로 모델링되어 있으며, 그에 비해 얇은 모양을 하고 있는 리딩 에지와 트레일링 에지는 원 또는 타원으로 모델링되어 있다. 따라서, 터빈 블레이드의 품질검사는 블레이드의 효율과 직접적으로 관련이 있는 입력면/흡입면의 윤곽도 오차와 리딩 에지와 트레일링 에지의 형상 오차에 대해서 이루어지고 있다.

본 논문에서는 현재 생산현장에서 사용하고 있는 터빈 블레이드의 제조 사양<sup>(8)</sup>을 적용하여, 활줄길이(chord length)를 기초로 하는 3차원 스플라인

곡선들을 사용하여 블레이드의 곡선을 모델링하였다. Fig. 3은 터빈 블레이드의 모델링을 보이고 있다.

스택킹 포인트(stacking point)로부터 Z만큼 떨어져 있는 에어포일 곡선의 *i*번째 세그먼트(segment)의 모든 점들의 좌표는 파라미터 *u* ( $0 \leq u \leq 1$ )를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r^i(u) = UCS^i = [X(u), Y(u), Z]$$

$$i=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

여기서,  $U = [1 \ u \ u^2 \ u^3]$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3-2 & -1 & \\ 2-2 & 1 & 1 & \end{bmatrix} \quad S_i = \begin{bmatrix} P_i \\ P_{i+1} \\ w_i t_i \\ t_{i+1} \end{bmatrix}$$

여기서,  $P_i, P_{i+1}$ 는 *i*번째와 *i+1*번째 조절점들의 좌표이며,  $t_i, t_{i+1}$ 는 점  $P_i, P_{i+1}$ 에서의 접선벡터이다. 또한,  $w_i$ 는 직전의 활줄길이에 대한 현재의 활줄길이의 비율이다.

$$w_i = |P_{i+1} - P_i| / |P_i - P_{i-1}|$$

for  $i=1, 2, \dots, n-1$  (2)

한편, 블레이드 곡면을 에어포일의 수직방향으로 정의하기 위한 스펠방향의 모델링도 파라미터 *v* ( $0 \leq v \leq 1$ )를 통해서 동일하게 정의할 수 있다. 즉, 조절점  $Q_j, Q_{j+1}$  사이에 있는 스펠방향의 블레이드 곡선  $r^j(v)$ 는

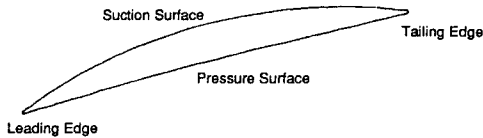
$$r^j(v) = (X^j(v), Y^j(v), Z^j(v))$$

$$= V C S^j \quad (3)$$

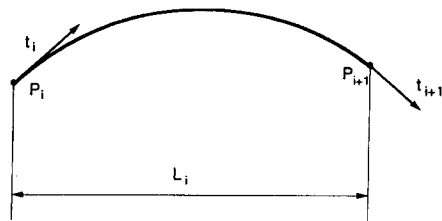
여기서,  $V = [1 \ v \ v^2 \ v^3]$ 이며,  $C$  및  $S^j$ 는 에어포일 방향으로의 모델링의 식 (1), (2)와 유사하게 정의된다.

에어포일 방향의 경계조건은 블레이드의 제조 스펠<sup>(8)</sup>에 따라, 에어포일 곡선이 에지 원(edge circle)과 접하는 것으로 경계조건을 설정하고, 스펠 방향에 대해서는 경계에서 가까운 연속한 4개의 조절점들이 3차곡선 위에 있는 것으로 경계조건을 설정 하였다.

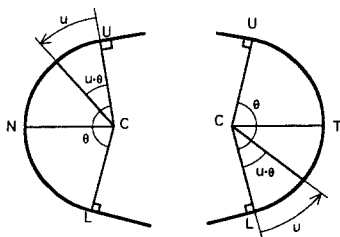
에지 원도 매개 파라미터에 의해서 Fig. 3(c)와 같이 모델링이 가능하다. 즉, 에지 원은 에지 원의 중심과 반경, 그리고 에지 원의 초기 각도 등에 의해서 형상이 정의되며, 파라미터  $u$  ( $0 \leq u \leq 1$ )에 의해서 다음과 같이 정의된다. 즉, 에지 원상에 위치



(a) Turbine blade's airfoil composed of spline and circle features



(b) Chord length based cubic spline curves



(c) Partial circles for leading edge and trailing edge

Fig. 3 Modeling of turbine blade

하는 점의 위치를  $r(u)$ 라고 하면,

$$r(u) = C + R(u) = (C.x, C.y) + (R\cos(\theta_0 + u\theta), R\sin(\theta_0 + u\theta)) \quad (4)$$

여기서,  $\theta_0$ 는 에지 원의 시작각도(선분 CU 및 CL이 기준직선과 이루는 각도)이며,  $\theta$ 는 에지원의 각도범위(선분 UC, CL이 이루는 각도)를 의미하고,  $R$ 은 에지 원의 반지름, 그리고  $C.x, C.y$ 는 에지 원의 중심의 좌표를 나타낸다.

한편, 블레이드 곡면상의 측정점들에 대해서 정밀한 측정을 수행하기 위해서는 곡면에 수직인 법선벡터 방향으로 측정기의 프로브가 접촉되어야 한다. 따라서 블레이드와 같은 곡면을 3차원 측정기로 측정하기 위해서는 블레이드 곡면에서의 법선벡터를 알아야 한다. 법선벡터 성분은 에어포일 방향과 스펠 방향의 접선벡터 성분의 벡터적에 의해서 구할 수 있다. 따라서, 에어포일 방향의 조절점  $P_i, P_{i+1}$ 과 스펠 방향의 조절점  $Q_j, Q_{j+1}$ 사이에서 정의되는 블레이드 곡면조각 위의  $(u, v)$ 위치의 점들에 대한 법선벡터,  $N_{ij}(u, v)$ 는 0과 1사이의 파라미터  $u$  및  $v$ 에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{ij}(u, v) = (\partial r^i(u)/\partial u \times \partial r^i(v)/\partial v) / |(\partial r^i(u)/\partial u \times \partial r^i(v)/\partial v)| \quad (5)$$

여기서, 법선벡터는 단위벡터로 만들기 위해 벡터의 크기로 나누어 준다.

따라서, 식 (5)으로부터 블레이드 곡면상에서 파라미터  $u, v$ 를 알게 되면 그 점에 대한 법선벡터가 계산된다.

### 3. 6점 측정에 기초한 좌표계 대략정렬

CAD에서 정의된 형상에 기초하여 3차원 좌표 측정기로 측정을 수행하기 위해서는 CAD 좌표와 측정기(CMM) 좌표 사이의 관계, 즉 좌표정렬(coordinate alignment)이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 좌표정렬을 기준면의 6점 측정법을 기초로 한 대략정렬(rough alignment)과 정밀정렬(precision alignment)의 두 단계로 나누어서 정렬을 수행하였다. 6점 측정법은 정밀한 면가공이 된 기준 블록을 가지는 측정 대상물을 측정기 위에 올려 놓고 기준블록이 놓인 평면과 기준블록의 다른

두 평면에 6점을 기준점으로 측정하여 좌표계 사이를 관계짓는 방법으로서 전통적으로 현장에서 사용되어 온 기술이다. 본 논문에서는 벡터 방정식을 이용해서 6점 측정법을 적용하여 CAD 좌표계( $X', Y', Z'$ )와 CMM 좌표계( $X, Y, Z$ )를 정렬하는 방법을 기술한다. Fig. 4에서 보는 바와 같이  $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3)$ 가 평면 1(기준 블록이 놓인 평면)상의 측정점;  $P_4(x_4, y_4, z_4), P_5(x_5, y_5, z_5)$ 를 평면 2( $Y'$ 축을 법선벡터로 가지는 블록상의 평면)상의 측정점,  $P_6(x_6, y_6, z_6)$ 가 평면 3( $X'$ 축을 법선벡터로 가지는 블록상의 평면)상의 측정점이 되도록 한다. 이때,  $P_1$ 에서  $P_6$ 까지의 측정점의 좌표는 CMM 좌표계( $X, Y, Z$ )에서 정의된다.

Fig. 4에서 CAD 좌표계의 기본방향 벡터  $X', Y', Z'$ 를 CMM 좌표계에서 표현하면 다음과 같다. CAD 좌표계의  $Z'$ 축 방향은 기준 블록상의 3점( $P_1, P_2, P_3$ )이 이루는 평면의 법선벡터 방향이 되고,  $Y'$ 축 방향은  $Z'$ 축 방향과 평면 2의 측정점( $P_5, P_4$ )이 이루는 방향 벡터와의 벡터적의 방향이 된다. 그리고  $X'$ 축의 방향은  $Y'$ 축의 방향과  $Z'$ 축의 방향의 벡터적의 방향으로 표시할 수 있다. 그러므로,

$$Z' = (P_2 - P_1) \times (P_3 - P_1) / |(P_2 - P_1) \times (P_3 - P_1)| = (a_z, b_z, c_z) \quad (6)$$

$$Y' = (P_5 - P_4) \times Z' / |(P_5 - P_4) \times Z'| = (a_y, b_y, c_y) \quad (7)$$

$$X' = (Y' \times Z') / |Y' \times Z'| = (a_x, b_x, c_x) \quad (8)$$

여기서,  $(a_x, b_x, c_x), (a_y, b_y, c_y), (a_z, b_z, c_z)$ 는 CAD 좌표계의  $X', Y', Z'$ 방향을 CMM 좌표계로 표시한 단위 벡터를 의미한다. 한편 위에서 고려한 측정점( $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ )은 프로브 볼의 중

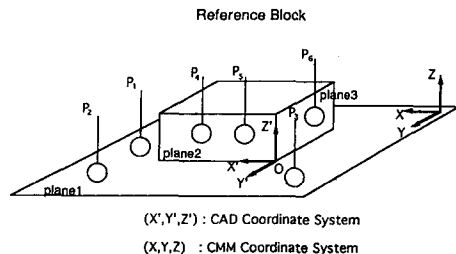


Fig. 4 Rough phase alignment based on 6 points probing

심점의 좌표로서 정확한 좌표정렬을 위해서는 프로브의 접촉점의 좌표를 구해야 한다. 측정대상물 좌표계, 즉 CAD 좌표계의 좌표축의 방향을 위의 식으로부터 구하였으므로 프로브 접촉점( $P_1', P_2', P_3', P_4', P_5', P_6'$ )의 좌표는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_1' &= P_1 - r(a_z, b_z, c_z) \\ P_2' &= P_2 - r(a_z, b_z, c_z) \\ P_3' &= P_3 - r(a_z, b_z, c_z) \\ P_4' &= P_4 - r(a_y, b_y, c_y) \\ P_5' &= P_5 - r(a_y, b_y, c_y) \\ P_6' &= P_6 + r(a_x, b_x, c_x) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $r$ 은 프로브 볼의 유효반경(effective radius)이다.

좌표계 정렬관계를 완성시키기 위해서, CAD 좌표계의 원점, 즉 기준블록의 원점을 CMM 좌표계로 표시하는 것이 필요하다. CAD 좌표계의 원점  $O(O_x, O_y, O_z)$ 는  $Z', X', Y'$ 축에 각각 수직한 위치 벡터들인  $OP_1', OP_4', OP_6'$ 를 적용함으로써 다음과 같이 구할 수 있다. 따라서,

$$\begin{aligned} OP_1' \cdot Z' &= (P_1' - O) \cdot (a_z, b_z, c_z) = 0 \\ OP_4' \cdot Y' &= (P_4' - O) \cdot (a_y, b_y, c_y) = 0 \\ OP_6' \cdot X' &= (P_6' - O) \cdot (a_x, b_x, c_x) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $P_1', P_2', P_3', P_4', P_5', P_6'$ 은 볼반경을 고려한 기준블록의 기준면상의 접촉점의 좌표이다. 그러므로 측정대상물의 원점의 좌표( $O_x, O_y, O_z$ )는 식 (10)으로부터 얻어지게 된다.

구해진 CMM 좌표계와 측정대상물 좌표계, 즉 CAD 좌표계 사이의 관계를 변환행렬로 나타내면, CMM 좌표값은 변환행렬과 CAD 좌표값의 곱으로 표현된다. 즉, CAD좌표  $D$ 와 CMM 좌표  $M$ 은

$$M = T_1 D$$

이 된다. 여기서,

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \\ 1 \end{bmatrix} & D &= \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \\ 1 \end{bmatrix} \\ T_1 &= \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & O_x \\ a_y & b_y & c_y & O_y \\ a_z & b_z & c_z & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

이 되고,  $M$ 과  $D$ 의 4번째 행과  $T_1$ 행렬의 4행과 4

열은 회전변환과 병진변환을 한 개의 변환행렬로 표시하기 위하여 고려되었다. 한편, 방향벡터만을 고려한 축소된  $3 \times 3$ 의 변환행렬,  $T_1^*$ 는

$$T_1^* = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x \\ a_y & b_y & c_y \\ a_z & b_z & c_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

이 된다.

두 좌표계 사이의 관계가 알려지면, 블레이드 곡면(압력면, 흡입면)에 대한 3차원 측정기의 CNC (Computer Numerical Control) 코드가 생성된다. CNC 코드는 변환행렬  $T_1$ 과 CAD 좌표계상에서의 측정 목표점의 좌표값의 곱으로부터 구해질 수 있다. 즉,

$$M = T_1(D + rN) \quad (13)$$

여기서,  $M$ 은 CMM 좌표계로 변환된 측정 목표점의 좌표이며,  $D$ 는 CAD좌표계에서의 측정 목표점의 좌표,  $r$ 은 CMM의 프로브 볼반경, 그리고  $N$ 은 측정 목표점의 단위법선벡터로서, 프로브 볼 반경 만큼의 옴셋벡터( $rN$ )을 CAD 좌표  $D$ 에 더하여 CAD 좌표값은  $(D + rN)$ 이 된다. 한편, 측정 프로브의 측정물로의 접근방향을 결정하는 CMM 좌표계에서의 접근방향 벡터  $DM$ 도  $T_1^*$ 행렬과 측정 목표점의 법선벡터 성분을 곱함으로써 얻을 수 있다. 즉

$$DM = T_1^* N \quad (14)$$

대략정렬(rough alignment)의 결과로서 측정기 CNC 코드가 생성되는데, CNC 코드는 일반적으로 널리 사용되고 있는 DMIS(Dimensional Measuring Interface Specification)<sup>(6)</sup> 포맷으로 출력되며, 이는 CMM에 심어져서 대략정렬에 의한 측정을 수행한다.

#### 4. 반복적 최소자승기법에 기초한 좌표계 정밀정렬

위에서 언급한 대략정렬의 결과로서 압력면과 흡입면에 대한 측정을 수행한다. 그러나, 기준블록의 면에서 측정된 여섯개의 측정점 데이터에 기초한 좌표계 대략정렬을 한 후에도 블레이드의 매우 얇은 에지부분에 있어서 식 (13), (14)에 의한 측정 목표점의 위치와 방향은 측정대상물의 실제 측정

목표점과는 차이가 존재하여 에지부분의 측정을 어렵게 한다. 이것은 기준 블록의 가공과정에서 생기는 기준블록의 형상오차와 CMM 쪽의 프로브오차 등의 원인으로 사료된다. 이러한 차이를 고려하기 위해서, 압력면 및 흡입면의 측정데이터를 기초로 하여, 두번째 변환행렬  $T_2$ 를 도입한다. MM을 대략정렬에 의해서 블레이드의 압력면과 흡입면을 3차원 측정기로 측정한 데이터라고 할때, 식 (13)에서 정의된  $T_1$ 의 역행렬, 즉  $T_1^{-1}$ 을 MM에 곱하면 측정점 데이터는 이에 대응하는 CAD 좌표계로 변환되게 된다. 그러므로 변환된 측정점 데이터 ( $T_1^{-1}MM$ )와 측정 목표점의 CAD 데이터 ( $D+rN$ ) 사이에서 존재하는 미소한 차이는 다음과 같이 두 번째 변환행렬  $T_2$ 를 도입하여 설명된다.

$$T_1^{-1}MM = T_2(D+rN) \quad (15)$$

여기서  $4 \times 4$ 의  $T_2$ 행렬은, 변환된 측정점의 데이터 ( $T_1^{-1}MM$ )와 측정목표점의 CAD 데이터 ( $D+rN$ )의 거리의 제곱의 합을 최소화하는 최소자승 방법에 의해서 결정될 수 있다.

$$E = \sum |T_1^{-1}MM - T_2(D+rN)|^2 \quad (16)$$

for all measurement points

변분원리 (variational principle)가  $T_2$ 행렬의 요소를 구하는 데 적용될 수 있으며, 효율적인 컴퓨터 계산을 고려하여 본 논문에서는 유사역행렬 (pseudo inverse matrix) 기법을 구현하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_2 = T_1^{-1}MM(D+rN)^T \times [(D+rN)(D+rN)^T]^{-1} \quad (17)$$

따라서 CMM 좌표계에서의 개선된 측정계획점  $M$ 은 CMM 좌표계에서 다음식에 의해서 얻어진다. 즉,

$$M = T_1 T_2 (D+rN) \quad (18)$$

이 되고, 이는 CNC 코드로 변환되어 CMM에 삽여 측정을 수행하게 된다. 만일 생성된 측정계획경로가 위에서 언급한 얇은 부분을 측정하는데 실패한다면, 위의 과정이 반복적으로 도입된다. 즉, 식 (18)에 의한 측정경로에 따라서 측정된 측정점 데이터  $MM^{(1)}$ 에 기초하여 두번째의  $T_1^{(2)}$ 행렬이 계산된다. 이를 일반적인 반복형태의 식으로 표현하면 다음과 같다. 즉,  $k$ 번째의  $T_2^{(k)}$ 행렬은  $k-1$ 번째로 반복하여 얻은 측정점 데이터  $MM^{(k-1)}$ 로부터

얻어진다.

$$T_2^{(k)} = T_1^{-1}MM^{(k-1)}(D+rN)^T \times [(D+rN)(D+rN)^T]^{-1} \quad (19)$$

그리고, 계속적인 반복여부에 대한 판정기준으로서 CAD 좌표계로 변환된 측정점 데이터 ( $T_1^{-1}MM^{(k)}$ )와  $T_2^{(k)}$ 에 측정 목표점의 CAD좌표를 곱한 데이터 ( $T_2^{(k)}(D+rN)$ )간의 거리를 모든 측정점들에서 구한 후, 이들 거리의 제곱의 합을 판정기준으로 삼는다. 즉, 거리제곱의 합, ERR은

$$ERR = \sum |T_1^{-1}MM^{(k)} - T_2^{(k)}(D+rN)|^2 \quad (19)$$

이 되고, ERR이 기준값, TOL보다 크지 않으면, 더 이상의 반복과정은 수행되지 않으며, 만일 ERR 이 TOL보다 크게 되면 추가적인 반복이 이루어 질 수 있어서, 더욱 정밀한 좌표계 정렬이 가능하다. Fig. 5는 대략정렬과 정밀정렬을 이용하여 좌표계 정렬을 수행하는 개발된 시스템의 순서도를 보이고 있다.

개발된 좌표 정렬 기술은 실제 터빈 블레이드의

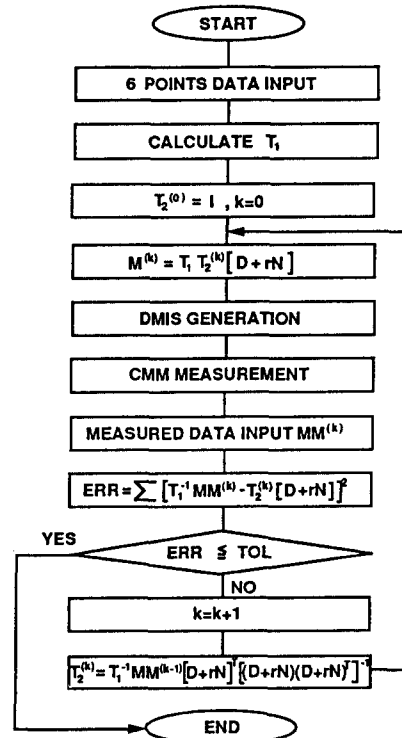


Fig. 5 Flowchart for developed system using rough and fine phase alignment

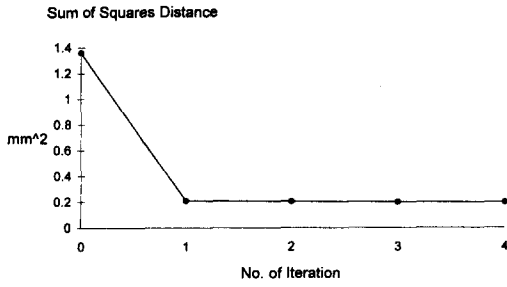


Fig. 6(a) Sum of squares distance for fine phase alignment vs iteration number

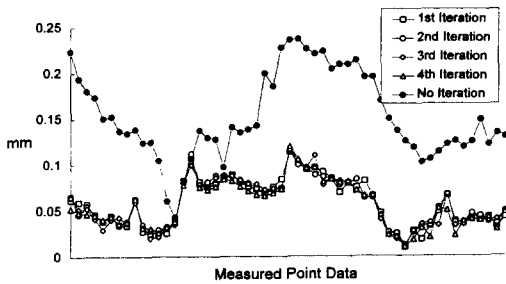


Fig. 6(b) Distance between the nominal and actual points

제작공정에 적용되었다. 터빈 블레이드는 활줄길이에 기초한 두개의 스플라인 곡선과 두개의 매우 작은 에지원( 반지름 약 0.15 mm)으로 구성되었다. 측정블레이드를 CMM에 놓은 후에 좌표계 대략 정렬을 위해 기준면에 여섯점을 찍은 후, 좌표계 대략정렬로부터 변환행렬  $T_1$ 이 계산되었으며, 스플라인 곡선에 대한 첫번째 측정이 이루어졌다. 스플라인 곡선에 대한 첫번째 측정의 결과는 좌표계 정밀 정렬에 사용되어, 측정된 데이터를 바탕으로 해서 앞에서 제안된 최소사승방법에 의해  $T_2$ 행렬을 계산하였다. 반복여부를 결정하기 위해서 (19)식에 의한 ERR이 계산되었으며, Fig. 6(a)는 반복횟수에 따른 거리의 제곱의 합을 그림으로표시한 것이다. Fig. 6(b)는 스플라인 곡선상에서 측정 계획점과 실제측정점의 거리를 반복횟수에 따라서 표시한 것이다. 따라서, 첫번째 반복측정 이후에 측정계획점과 실제측정점의 거리가 매우 작아짐을 볼 수 있다. Fig. 7은 좌표계 정밀정렬을 하기 전후의 측정 경로를 보여주는 것이다. 여기서, 측정경로는 정밀 정렬을 행한 이후에 얇은 에지 원을 짚 수 있도록 약간 이동하고 회전한 것을 볼 수 있다. 생성

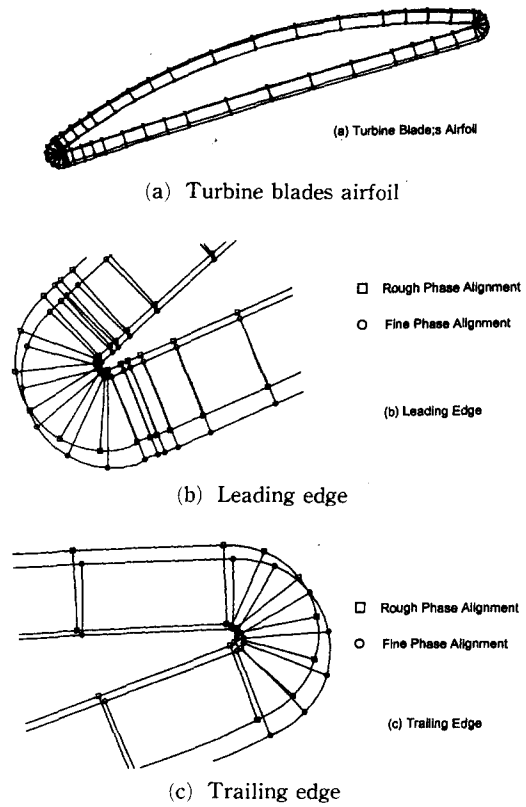


Fig. 7 Typical measurement paths before and after fine alignment

된 측정경로에 의해서 대략정렬만으로는 불가능했던 터빈 블레이드 에지면의 측정이 성공적으로 이루어졌다. 따라서 제안된 좌표 정밀정렬기법은 얇은 에지를 가지고 있는 터빈 블레이드의 측정에 있어서 효율성을 보여주었다.

## 5. 공차평가

### 5.1 공차평가 알고리즘

블레이드의 형상 공차를 평가함에 있어서 적용되는 주요 공차 스펙은 블레이드 면의 윤곽도 공차로서, 이는 블레이드의 성능과 효율에 직접적인 영향을 미친다. 윤곽도 오차를 해석하고자 할 때 나타나는 일반적인 어려움중의 하나는 곡면을 가지는 부분이 삼차원 측정기에 의해 측정될 때는 실제 측정된 점과 CAD상에서 계획된 측정 목표점이 차이를 보인다는 사실로서 이는 곡면의 형상오차와 삼차원 측정기의 오차, 그리고 측정프로브의 볼 반경

등에 기인하는 것으로 사료된다. 그러므로 정밀한 윤곽도 오차계산을 위해서는 역으로 실제 측정점 데이터로부터 이에 대응하는 CAD상의 대응점을 찾아서 윤곽도 오차 계산을 수행해야 한다. 본 논문에서는 반복적인 방법을 사용하여 실제 측정점에 대응하는 점을 찾는 효율적인 곡선분할(subdivision) 알고리즘을 사용하였다. 실제 측정점의 데이터를  $MM_i$ 라고 하고, CAD상의 대응하는 점을  $DD_i$ 라고 할 때,  $DD_i$ 를 구하는 곡선분할 알고리즘은 다음과 같다.

- (1) 반복 인덱스  $k$ 의 초기값을 1로 한다.
- (2) CMM좌표계와 CAD 좌표계 사이의 변환행렬  $T$ 를 식 (18)의  $T_1, T_2$ 의 곱으로부터 구한다.
- (3) 대응점의 초기치  $DD_i^{(0)}$ 를 CAD상의 측정 계획점  $(D_i + rN_i)$ 으로 둔다.
- (4) 매개변수로 표시된 곡선의 부분에서 매개 변수  $u=1/4, 1/2, 3/4, 1$  되는 곡선상의 점을 잡는다.
- (5) 매개변수  $u=1/4, 3/4$  일때, 이 점들과 실제 측정점간의 거리  $d = |T^{-1}MM_i - DD_i^{(k-1)}|$ 를 구한다.
- (6) 두 점 중에서 더 가까운 것을  $DD_i^{(k)}$ 로 한다.
- (7) 가까운 점이 위치하는 곡선 세그먼트의 부분

( $u=1/4$  이면  $0 \leq u \leq 1/2$ 의 부분,  $u=3/4$  이면  $1/2 \leq u \leq 1$ 의 부분)을 4분하여 매개변수  $u$ 를 0, 1/4, 1/2, 3/4, 1로 새로이 설정한다.

(8)  $e = |DD_i^{(k)} - DD_i^{(k-1)}|$ 를 계산한다.

(9)  $e$ 값이 설정치(TOL)보다 작거나 같으면 작업을 종료하고, 설정치보다 큰 경우에는  $K$ 를 1 증가시키고 위의 (4)과정으로 들어가서 반복적으로 수행한다.

Fig. 8은 개발된 곡선분할 알고리즘의 순서도를 보여주고 있다.

5.2 체비셰프 놈에 의한 윤곽도 오차 계산

국제표준기구(ISO)<sup>(9)</sup> 등에서 정의하는 최소영역 기준에 의한 윤곽도 오차계산의 한 방법으로서 본 논문에서는 체비셰프 놈(Tschebyscheff Norm)을 반복적으로 적용하여 곡면의 윤곽도 오차를 정확하게 계산하는 윤곽도 오차 계산 알고리즘을 개발하였다.

$MM_i$ 를 블레이드 곡선면상의 측정점 데이터라 하고,  $DD_i$ 를 위의 곡선분할 알고리즘에 의하여 찾은 측정점에 대응하는 CAD 상의 점이라고 한다. 변환행렬  $T$ 를 측정점 데이터와 대응하는 CAD상의 점 사이의 관계를 나타내는 변환행렬이라 하면 CAD 좌표계에서 계산된 체비셰프 놈  $L_p$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_p = [\sum |T^{-1}MM_i - P_i|^p]^{1/p} \quad i=1, 2, \dots \quad (20)$$

변환행렬  $T$ 에 대해  $L_p$ 는 최소화될 수 있으며, 최적변환행렬  $T_o$ 를 Goch 등<sup>(7)</sup>의 알고리즘을 이용해서 구할 수 있다. 그리고 최적 변환행렬, 즉, 최소의  $L_p$ 를 가질때의 윤곽도 공차  $E$ 는 측정점과 CAD상의 대응점간의 최대거리가 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \max |T_o^{-1}MM_i - DD_i| \text{ for } i=1, 2, \dots \quad (21)$$

본 논문에서 개발된 윤곽도 오차평가를 위한 알고리즘은 다음과 같다.

- (1) 반복 인덱스  $k$ 를 0으로 하고, 초기 변환행렬  $T^{(0)}$ 를 식 (18)의  $T_1$ 과  $T_2$ 의 곱으로부터 구한다.
- (2) 측정점 데이터  $MM_i (i=1, 2, \dots, n)$ 를 입력 받는다. 여기서,  $n$ 는 곡면상에서의 측정점의 개수를 말한다.
- (3) 측정점에 대응하는 CAD상의 점을 측정계획점으로 초기화시킨다.
- (4) 윤곽도 오차,  $E^{(0)} = \max [|T^{(0)}|^{-1}MM_i$

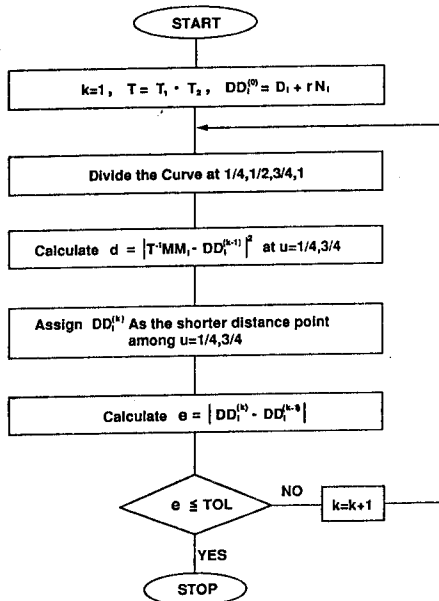


Fig. 8 Flowchart of the subdivision technique for the closest points



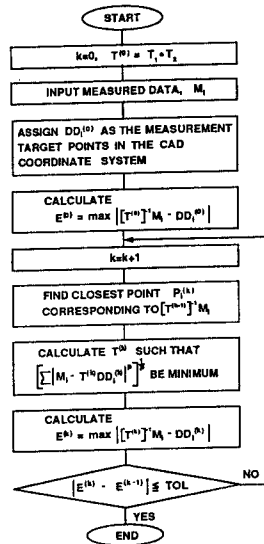


Fig. 9 Flowchart of the profile tolerance algorithm based on the iterative tschebyscheff norm

$-DD_i^{(0)}$  (for  $i=1, \dots, n$ )를 계산 한다.

(5)  $K$ 를 1만큼 증가 시킨다.

(6) 변환된 측정점 좌표  $[T^{(k-1)}]^{-1}MM_i$ 에 대응하는 CAD 상의 점  $DD_i^{(k)}$ 를 곡선분할 알고리즘을 통해서 찾는다.

(7) 체비셰프 놈  $[\sum |[T^{(k)}]^{-1}MM_i - P_i^{(k)}|^p]^{1/p}$ 을 최소로 하는 변환행렬  $T^{(k)}$ 를 구한다.

(8) 윤곽도 오차  $E^{(k)} = \max |[T^{(k)}]^{-1}MM_i - DD_i^{(k)}|$ 를 구한다.

(9) 윤곽도 오차의 증분  $|E^{(k)} - E^{(k-1)}|$ 을 구하고 미리 정해진 값(TOL)보다 크면 (5)의 과정으로, 작거나 같으면 작업을 종료한다.

따라서 윤곽도 공차평가를 위한 모듈이 구현 되었으며, Fig. 9는 구현된 알고리즘의 순서도를 보이고 있다.

### 5.3 공차평가 결과

개발된 윤곽도 공차평가 모듈은 터빈 블레이드의 검사 공정에 적용되었다. Fig. 10은 반복횟수가 증가함에 따른 최대오차, 즉 윤곽도 오차가 감소하는 것을 보여 주고 있다. 그리고, 체비셰프 놈의 지수가 증가함에 따라, 수렴속도가 느려지고, 계산의 시간이 조금 더 걸리는 만큼 윤곽도 오차는 보다 작은 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 실제 블레이드를 측정된 결과 입력면과 흡입면의 윤곽도 오

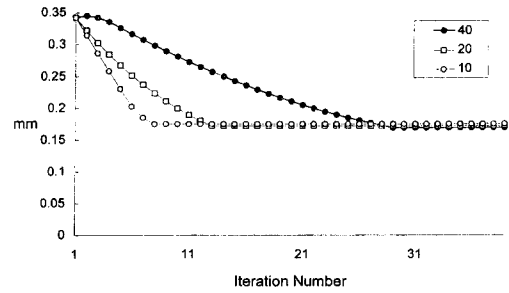


Fig. 10 Maximum deviation (profile tolerance) vs iteration number

차는 각각 0.168 mm, 0.171 mm로 나타났다.

또한 리딩 에지와 트레일링 에지의 반경은 각각 0.148 mm, 0.154 mm로 평가되었다.

## 6. 결 론

(1) 기준면상의 6점에 의한 좌표계 대략 정렬기법과 반복적 곡면 측정에 기초한 최소자승방법에 따른 좌표계 정렬기법이 개발되었다. 개발된 좌표계 정렬기법은 특히 비행기 부품과 같은 매우 얇고 복잡한 부분의 측정에 유용하였다.

(2) 본 논문에서는 CAD/CAI 통합에 의한 측정/검사가 가능하도록 하는 컴퓨터 시스템이 개발되었으며, CAD/CAI 통합기법은 특히 매우 얇은 부분을 가지는 복잡한 형상의 제품을 검사할 때 매우 유용한 것으로 사료된다. 또한, CAD에서 정의된, 곡선이나 복잡한 형상도 CAD/CAI 환경에서의 좌표계 정렬의 기준으로서 성공적으로 이용될 수 있었다.

(3) 측정점에 대응하는 CAD상의 점을 효율적으로 찾아나가는 알고리즘이 개발되었다. 따라서, 가공물의 오차, CMM의 오차 등에 기인한 측정계획점과 측정점의 불일치 문제가 해결되었다.

(4) 체비셰프 놈에 의한 해석방법을 곡면의 윤곽도 공차해석에 적용하였으며, 이때 체비셰프 놈을 최소화하면서 윤곽도 오차를 계산하는 반복적 알고리즘을 개발하였다. 따라서, 정확한 측정점을 알지 못하는 경우에 체비셰프 놈에 의한 윤곽도 오차를 계산할수 있는 방법이 제안되었다.

## 참고문헌

(1) Duffie, N., Bollinger, J., Piper, R. and

- Kroneberg, M., 1984, "CAD Directed Inspection and Error Analysis Using Surface Patch Databases," *Annals of CIRP*, Vol. 33, pp. 347~350.
- (2) Bojanic, O. P., Majstrovic, D. V. and Milacic, R. V., 1992, "CAD/CAI Integration with Special Focus on Complex Surfaces," *Annals of CIRP*, Vol. 41, pp. 535~538.
- (3) Meng, C. H., Yau, H. T. and Lai, G. W., 1992, "Automated Precision Measurement of Surface Profile in CAD Directed Inspection," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 2, pp. 268~278.
- (4) Pahk, H. J., Kim, Y. H., Hong, Y. S. and Kim, S. G., 1993, "Development of Computer Aided Inspection System with CMM for Integrated Mold Manufacturing," *Annals of CIRP*, Vol. 42, pp. 557~560.
- (5) Choi, B. K., 1991, *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier.
- (6) *Dimensional Measuring Interface Specification Ver 2.1*, 1989, Computer Aided Manufacturing-International, Inc.
- (7) Goch, G. and Tschudi, U., 1992, "A Universal Algorithm for the Alignment of Sculptured Surfaces, 597-600," *Annals of CIRP*, Vol 41, pp. 597~600.
- (8) *Manufacturing Specifications for Blades*, Samsung Aerospace.
- (9) *Applied Metrology Limits, Fits and Surface Properties*, 1988, ISO Standards Handbook.