

## Heel angle조정에 의한 터빈 블레이드의 5축 NC가공 데이터 생성

이철수\*, 박광렬\*\*

### Generation of 5-axis NC Data for Machining Turbine Blades by Controlling the Heel Angle

Cheol-soo Lee\* and Gwang-ryeol Park\*\*

#### ABSTRACT

In general, turbine blades are usually machined on 5-axis NC machine. The 5-axis machining of sculptured surface offers many advantages over 3-axis machining including the faster material-removal rates and an improved surface finish. But it is difficult and time-consuming to generate interference-free 5-axis tool path. This paper describes research on the algorithm for generation of an interference-free 5-axis NC data for machining turbine blades. The approach, using the section profile derived from the intersection of cutting planes with a triangulated-surface approximation, includes (1) CL-data generation by detecting an interference-free heel angle (2) the calculation method for finding a adaptive feed-rate value, and (3) the inverse kinematics depending on the structure of 5-axis machine.

**Key words :** 5-axis machining, Turbine blade, Heel angle, Interference avoidance

## 1. 개 요

### 1.1 연구의 배경 및 목적

5축 가공은 기계의 자유도가 5개인 NC기계를 이용하여 가공하는데 일반적인 3축 가공으로 가공이 불가능한 형상을 가공하기 위해 주로 이용된다. 5축 가공을 이용한 대표적인 예로는 터빈 블레이드, 자동차의 타이어 금형이나 마스터 모델, 선박의 스크류 등이 있다. 5축 가공은 작업물에 접근하는 공구의 각도를 조절해 가공성을 좋게 하거나 표면의 정도를 개선하는 등 많은 장점이 있지만 공구 경로 생성에 있어 어려움이 많고 3축에 비해 가공 비용이 크다<sup>[1,3]</sup>.

터빈 블레이드는 항공기나 선박 엔진의 터빈에 장착되어 섭씨 2천도의 고온과 고압에서 연소된 공기를 회전력으로 바꾸는 역할을 하는 부품으로 주로 Fig. 1과 같은 형상이다. 이러한 형상의 가공물은 셋업 자세를 바꾸지 않고는 3축 가공으로 불가능하며

볼 엔드밀(ball end mill)에 의한 4축 가공이 가능하다. 그러나 가공성이 상대적으로 우수한 플랫 엔드밀(flat end mill)을 사용하는 경우는 5축 가공이 불가피하다.

터빈 블레이드 가공을 위한 5축 가공 데이터를 생성하기 위해서는 일반적인 5축 가공과 마찬가지로 가공물에 대한 공구 기울임, 절삭 속도의 부여, 공구 간섭 체크 등의 문제점을 해결해야 한다<sup>[1]</sup>. 블레이드 형상은 대부분 하나의 곡면으로 모델링되지 않는데 본 논문에서는 다면체로 표현된 터빈 블레이드 모델을 이용하여 이러한 문제점들을 고려한 5축 가공 데이터를 산출하는 효과적인 방법을 제안하고자 한다. 제안된 방법은 블레이드 단면의 한바퀴를 한번에 가공하는 가공 경로를 산출해 가공데이터로 이용한다.

### 1.2 기존의 연구

5축 가공에 관한 연구는 NC가공 데이터의 생성에 관한 연구<sup>[1,2]</sup>와 생성된 가공 데이터의 검증에 관한 연구<sup>[4]</sup> 등이 많이 이루어졌는데 실제로는 가공데이터의 생성 과정에서 간섭을 고려한 가공 데이터 산

\*종신회원, 전남대학교 산업공학과

\*\*학생회원, 전남대학교 산업공학과

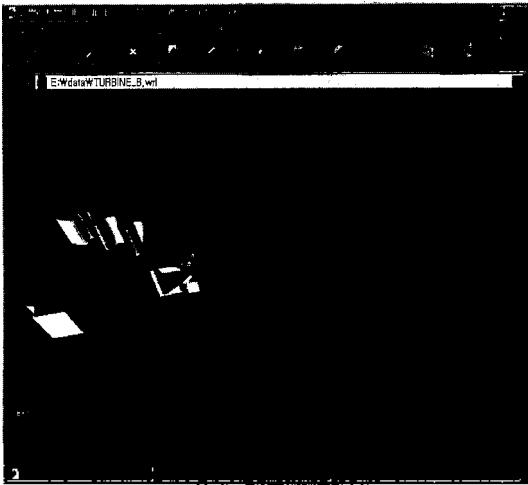


Fig. 1. Example model of a turbine blade.

출을 위해서 가공데이터 검증을 위한 알고리즘의 적용이 필요하다.

5축 가공 경로에 관한 연구로는 자유 곡면의 5축 NC데이터 생성에서 주로 간섭 제거와 가공 부하의 조절에 관한 연구가 이루어지고 있는데 일반적으로 간섭의 확인에 매우 많은 계산과 시간이 소요된다<sup>[1]</sup>. 가공 데이터는 매개변수 곡면을 이용하는 방법이 주로 많이 이루어졌으며<sup>[1]</sup> 최근 다면체 모델을 위한 방법들도 제시되고 있다<sup>[12]</sup>. 블레이드 형상의 NC가공에 관한 연구로는 소모된 날개 부위의 형상을 측정 한 후 상용 라이브러리를 이용하여 곡선으로 근사화 하여 가공 데이터를 산출하는 방법이 제안된 바 있다<sup>[5]</sup>. 특히 4축 가공에서 볼랜드 밀의 간섭제거된 공구 자세를 산출하는 방법이 제안된 바 있는데<sup>[6]</sup> 블레이드 곡면을 플랫폼 엔드밀로 가공하는 경우는 5축 제어기가 필요하며 heel angle의 조정에 의해 가공성이 향상된다.

5축 가공은 선형 운동과 회전 운동이 동시에 이루어지는데 이때 NC컨트롤러는 이 두가지를 구분하지 않고 고정된 이송비(feedrate)로 기계를 동작하기 때문에 5축 가공 데이터 생성할 때는 해당 5축 기계의 기구적 구조에 적절한 이송비 제어 방법이 필요하다. 일정한 절삭력을 유지하면서 커슘(cusp) 높이를 최소화하면서 정밀한 5축 가공을 위한 연구<sup>[7]</sup>가 이루어졌는데 다양한 형태의 자유 곡면을 사례로 하고 있다.

매개변수 곡면 모델과 Z-map 모델 그리고 다면체 모델 등을 이용하여 5축 가공 데이터를 산출하는 방법이 전반적으로 소개된 바 있다<sup>[8]</sup>. 이 연구에서는

매개변수 곡면으로 표현된 프로펠러의 5축 가공 데이터 생성 절차를 제시하였는데 특히 다면체 모델의 간섭 제거를 Bucket-map이란 개념을 이용하여 속도를 개선하는 방법을 제안하였다.

### 1.3 연구 내용 및 범위

본 논문에서는 터빈 블레이드를 5축 가공하기 위한 간섭이 배제되고 공구의 일정한 절삭속도를 유지해주는 가공 데이터 생성을 위한 빠르고 효과적인 방법을 제안한다. 대부분의 블레이드 형상이 하나의 곡면으로 모델링되지 않기 때문에 CC-parametric path를 산출하지 않고 다면체로 표현된 블레이드 형상 모델만으로 CC-cartesian path를 생성하도록 하였다. 생성된 5축 가공 경로는 블레이드 단면을 한번에 한바퀴를 가공하도록 산출되며 블레이드 형상의 특징을 이용하여 공구 간섭제거가 매우 신속하게 이루어진다.

간섭 제거 과정에서는 공구 자세가 변하는데 이때 공구 기울임각인 heel angle이 미리 설정된 값에 최대한 근접하거나 또는 정해진 구간에서 간섭이 전혀 없는 일정한 값이 유지되도록 하는 등의 방법으로 heel angle 값이 수정되도록 하였다.

5축 기계에서는 경로를 따라 움직이는 공구의 끝부분의 절삭 속도가 이송속도에 비례하지 않기 때문에 가공 부위의 블레이드 형상을 반영하여 실제 가공 부위의 절삭 속도가 일정하도록 이송비를 수정하여 5축 가공 데이터를 생성하였다.

## 2. 터빈 블레이드의 5축 가공

### 2.1 제안된 시스템의 개요

제안된 터빈 블레이드의 5축 가공 시스템의 구성은 Fig. 2와 같다. CC(Cutter Contact) 데이터 및 공구 방향의 결정을 위해서는 블레이드 곡면에 관한 정보가 필요한데 본 연구에서는 블레이드의 곡면을 삼각형으로 근사화한 데이터를 이용한다. 곡면을 삼각형으로 근사화하는 작업은 거의 모든 3D CAD에서 지원하며 흔히 RP를 지원하는 STL형식이 많이 사용된다.

다면체 모델과 가공 위치에 따른 단면과의 교선은 공구 끝 점(CC point)의 위치가 되며 다면체에서 교선이 발생한 삼각형의 법선 벡터를 교선의 벡터로 보관하여 간섭에 의한 공구 위치(CL point)를 수정할 때 사용한다. 공구 heel angle은 초기에 주어지지만 제안된 간섭 체크 절차를 거쳐 간섭이 제거된 heel

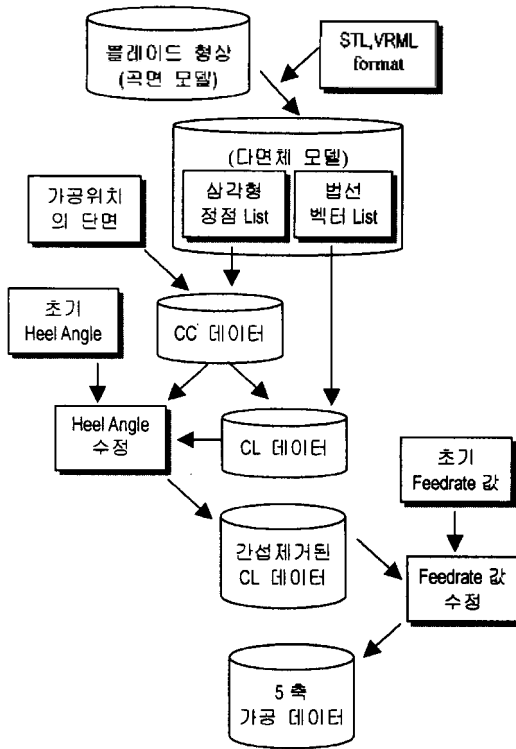


Fig. 2. Practical steps in calculating 5-axis NC-data for machining turbine blade.

angle로 수정된다. 실제로 5축 기계에서 가공할 때는 기계의 각 축의 이송속도와 공구 끝점의 이동 속도가 다르기 때문에 실제 가공이 이루어지는 공구 끝점에서의 절삭 속도의 차이가 일정하도록 이송비(feedrate)를 수정해야한다.

이와같은 과정으로 CC데이터, 간섭이 제거된 CL 데이터가 산출되고 각 가공 위치에서의 이송비가 결정되면 5축 가공 데이터의 생성이 가능하다. 제안된 방법을 실험한 결과, 블레이드 형상의 특성을 이용하면 간섭 체크가 필요없는 부분에 대한 계산량이 줄어들고 일정 구간동안 일정한 heel angle을 유지하는 것도 가능하였다. 이 경우 불필요한 계산이 줄고 계산이 간단해지며 따라서 가공 데이터 산출에 소요되는 시간을 줄일 수 있다.

2.2 터빈 블레이드 모델

터빈 블레이드 곡면은 주어진 공차를 만족하는 다면체 형상으로 변환될 수 있다. 블레이드 형상은 일반적으로 하나의 곡면으로 모델링되지 않는데 대부분의 3차원 형상을 지원하는 모델러에서는 VRML이나 STL 포맷 등을 지원하며 이를 데이터로 출력해

준다. 특히 삼각형으로 이루어진 STL포맷은 거의 모든 3차원 CAD에서 지원하고 있다.

본 논문에서는 4축 또는 5축 가공에서 다면체 모델과 단면으로 설정된 임의의 평면과의 교선인 단면 프로파일을 구하여 가공 데이터 생성할 때 이용하도록 하였다. 이러한 단면 프로파일은 공구 끝점의 위치인데 공구의 축벡터 방향은 교선이 발생한 삼각형의 법선 벡터를 단면 프로파일과 함께 보관하여 공구 heel angle을 적용하거나 간섭이 제거된 새로운 heel angle을 산출할 수 있었다.

2.3 터빈 블레이드의 가공

터빈 블레이드를 가공할 때 초기 피삭재(raw stock)의 셋업 자세를 변경하면서 여러 번 가공하면 3축 가공이 가능한 경우가 있다. 예를 들어 블레이드 날개를 길이 방향의 축을 중심으로 180도씩 회전하면 날개는 상하 곡면으로 구분될 수 있다. 블레이드 형상에 따라 다르겠지만 한번의 셋업 자세 변경으로 블레이드의 상하의 날개 곡면이 가공 되는 경우도 있다. 3축으로 블레이드 형상을 가공하는 경우에는 플랫폼 엔드밀의 사용에 제약을 받게되어 대부분 볼 엔드밀만 사용해야 한다.

볼 엔드밀을 이용하는 경우 4축 가공 만으로도 가능하지만 상대적으로 가공성이 매우 우수하고 다양한 가공 방법의 적용이 가능한 플랫폼 엔드밀을 사용하는 경우 5축 가공이 불가피하다. 일반적으로 5축 가공은 3축, 4축에 비해 공구 경로 계산이 복잡하고 간섭 제거에 많은 시간이 소요된다. 그러나 형상에 대한 특성을 감안하면 효과적으로 가공 데이터를 생성할 수 있는데 본 논문에서는 특히 블레이드 형상을 고려하여 효율적이고 신속하게 5축 가공 데이터를 산출하는 방법을 제안한다.

2.4 5축 가공경로의 생성

본 연구의 다면체 모델은 곡면이 삼각형으로 근사화된 것인데 곡면과의 공차의 정도에 따라 삼각형의 모양과 크기, 개수를 달리한다. 주로 삼각형의 세 꼭지점과 삼각형이 속한 평면의 법선 벡터를 보관하는데 세 점의 보관 순서에 의미를 두어 표면(front face)과 배면(back face)을 구분하기도 한다.

다면체로 표현된 블레이드와 임의의 평면과의 교선을 찾는 것은 매우 간단하다. 공간 상에서 직선과 평면과의 교점만 구하면 삼각형과 무한 평면과 교선을 산출할 수 있는데 모든 삼각형에 대해 이 교선들을 연결하면 단면으로 설정한 평면의 블레이드 단면

프로파일을 구할 수 있다. 이때 가공 진행 방향 벡터는 이 단면 상에 존재하며 스캔 방향은 다음 경로를 산출하기 위해 단면이 이동하는 방향이다.

공구의 간섭 제거는 공구가 주어진 heel angle로 가공할 때 블레이드 형상과 간섭이 일어나는 경우를 미리 계산해 heel angle을 적절하게 수정하면 된다. 간섭이 제거된 경로는 5축 기계의 기구적 구조에 맞는 역기구학 계산에 의해 NC데이터로 변환된다.

### 3. 간섭 제거된 CL데이터의 산출

#### 3.1 가공 경로 산출 (CC데이터)

5축 가공 경로 산출 방법은 여러가지가 있겠지만 본 연구에서는 블레이드 형상이 다면체로 표현된 모델이기 때문에 임의의 평면과의 교선을 계산하여 CC 데이터로 이용한다. 임의의 평면이란 다면체를 자르는 단면이며 이 단면의 프로파일이 교선이 된다. 교선을 구하는 과정은 다음과 같다.

단계 1. 음함수식 형태로 단면을 설정한다.

예) 평면의 표현식

$$f(x, y, z) = ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

(단, 평면의 법선벡터=(a,b,c))

단계 2. 삼각형의 세 점  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 에 의해 모서리에 해당하는 선의 식을 구한다.

예) 선의 표현식

$$R(t) = P_1 + t(P_2 - P_1) \quad (2)$$

(단,  $t \in [0,1]$ )

단계 3. 단면과 삼각형의 교선을 구한다(세 선분과 평면의 두 교점이 교선 선분의 양 끝점).

예) 직선과 평면의 교점을 구하려면

(1) 식과 (2)식을 연립하여 구한  $t^*$ 가 0과 1사이인 경우 교점은  $R(t^*)$

단계 4. 교선 선분의 양 끝점과 삼각형의 법선 벡터  $n(nx, ny, nz)$ 을 배열에 보관한다.

단계 5. 모든 삼각형에 대해 단계 2,3,4를 반복한다.

단계 6. 배열에 저장된 선분을 연결된 형태로 정렬한다.

단면의 프로파일인 교선은 단면을 시작점에서 끝점까지 일정한 간격과 방향으로 이동하면서 구하는데, 시작점과 끝점은 블레이드 날개를 형성하는 삼각형들의 경계상자(bounding box)에 의해 산출된다. 예를 들어 Fig. 3(a)와 같이 경계상자에서 날개의 길이 방향에 대한 최소 및 최대 값에 의한 범위에서 일정한 간격으로 단면을 설정하여 Fig. 3(b)와 같이 단면 평면과 블레이드 곡면의 교선, 즉 해당 단면의 프로파일을 구한다.

단면 프로파일인 교선은 각 삼각형과 무한 평면이 이루는 교선 선분을 연결한 것이다. 예를들어 삼각형의 각 선분의 두 점의 좌표  $(x_1, y_1, z_1)$ 과  $(x_2, y_2, z_2)$ 를 각각 평면의 식  $f(x, y, z)$ 에 대입하여 두 결과의 부호가 서로 다른 경우만 교점을 계산하면 계산량을 줄일 수 있다. 삼각형과 단면의 교점은 두 점이 산출되고 이 두 점이 교선 선분의 시작점과 끝점이 된다.

모든 삼각형과 교선 선분이 계산되면 시작점과 끝

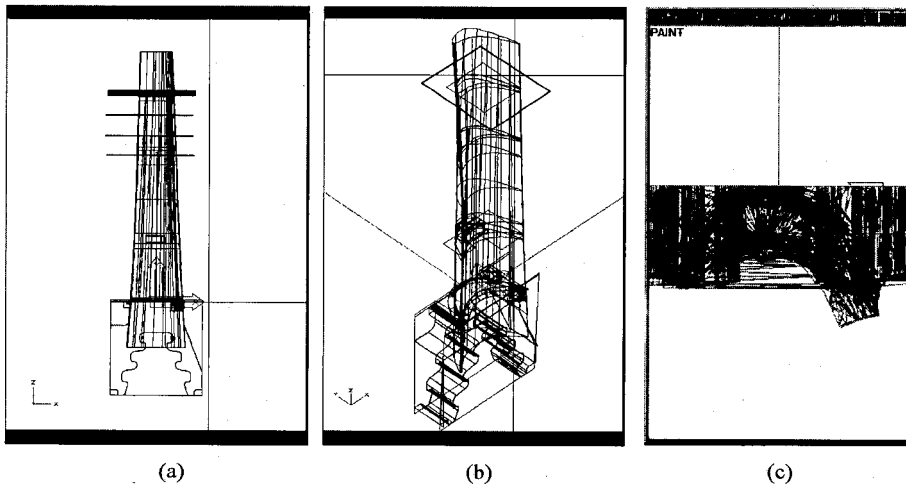


Fig. 3. Example of a blade profile-intersection of blade surface and section plane. (a) side view (b) isometric view (c) top view

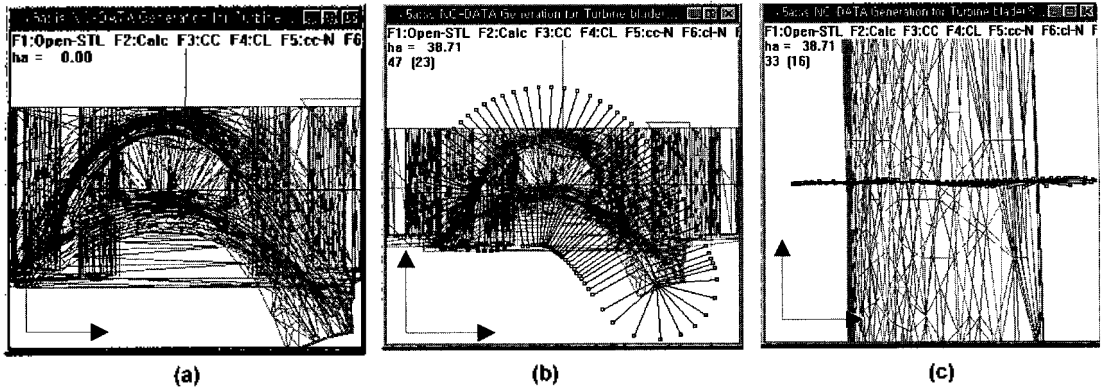


Fig. 4. A blade profile and its normal vectors. (a) profiles of a blade (b) top view (c) side view

점을 비교하여 교선을 연결할 수 있다. 교선은 단면을 이동해 가면서 연속해서 산출할 수 있는데 이 단면의 간격이 가공 경로의 간격이 된다. 가공 경로의 간격은 heel angle 등과 함께 컵의 높이를 결정하는 요인이 되는데 정밀한 5축 가공을 위해 컵의 높이를 고려한 5축 가공 경로 산출에 관한 연구가 이루어진 바 있다<sup>[7]</sup>.

이렇게 산출된 각 단면의 교선이 그 단면의 프로파일인데 그 예를 Fig. 4(a)에서 보이고 있다. 프로파일의 각 위치에서 곡면의 법선 벡터를 블레이드 날개 방향의 평면에서 보면 Fig. 4(b)와 같이 보일 것이다. 이 법선 벡터와 공구 진행 방향에 의해 heel angle을 변화할 때의 중심축이 결정되는데 프로파일의 법선 벡터는 Fig. 4(c)에서 보이듯이 단면과 동일 평면에 존재하는 것은 아니다.

3.2 heel angle에 의한 공구 위치 데이터 생성 (CL데이터)

블레이드 단면의 프로파일 점렬과 각 점에서의 법선벡터를 알고 있으면 공구의 자세를 결정할 수 있다. 단면 프로파일의 점렬은 한 평면에 존재하지만 각 점에서의 법선벡터는 대부분 그 평면에 존재하지 않는다. 왜냐하면 블레이드 날개의 길이방향의 단면 프로파일도 곡선의 형태이기 때문이다.

프로파일의 법선 벡터 방향을 공구 축벡터와 일치시키면 Fig. 5(a)와 같이 5축 가공이 가능한데 이 경우에는 가공이 일어나는 위치가 공구 바닥을 포함하고 있어 바닥 중심에 가공날이 없는 플랫 엔드밀의 경우에는 가공이 불가능하다.

따라서 Fig. 5(b)와 같이 공구 끝(heel) 부위로 가공을 해야되는데 이 경우에는 공구의 축벡터 방향을 일치하지만 CC point와 CL point가 일치하지 않는

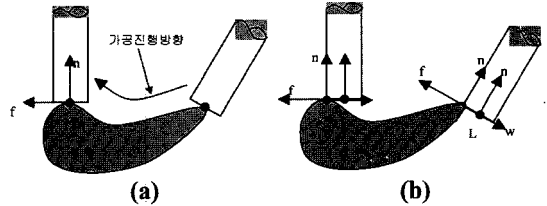


Fig. 5. Cutter location for 5-axis flat-end cutter (heel angle = 0).

다. 플랫 엔드밀의 공구 반지름이 r이고 곡면의 법선 벡터가 n, 공구 진행 벡터가 f, 프로파일에 있는 CC point의 위치가 C일 때 CL point의 위치 L은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$L = C + rw \tag{3}$$

(단, w = -f)

실제로는 가공성의 향상이나 블레이드 형상에 의한 간섭제거를 위해 heel angle이 적용되어야 한다. Fig. 6과 같이 프로파일이 법선 벡터를 단면의 법선 벡터를 회전축으로 heel angle만큼 회전하여 새로운 벡터를 구해 공구 축 벡터로 결정하면 되는데 heel angle값인  $\theta$ 가 적용되는 경우의 CL point의 위치  $L_\theta$

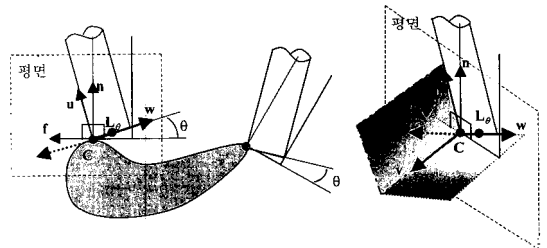


Fig. 6. Cutter location for 5-axis flat-end cutter (heel angle > 0).

은 식 (4)와 같다.

$$L_0 = C + rw \tag{4}$$

단,  $w = n \times (n \times u) / |n \times u|$   
 $u = \cos\theta \cdot n + \sin\theta \cdot f$   
 $v = (n \times u) / |n \times u|$   
 $w = n \times v$

### 3.3 블레이드 형상의 공구 간섭 제거

5축 가공에서 플랫폼 엔드밀을 사용하면 볼 엔드밀보다 커승의 높이도 적을 뿐 아니라 다양한 heel angle을 적용하여 가공성을 향상시킬 수 있다. heel angle은 간섭이 발생하는 부위가 없다면 초기 heel angle을 유지하는 것이 좋을 것이다.

블레이드 형상에 대한 단면 프로파일을 보면 오목한 부위가 존재하는데 이 부위에서는 공구 간섭 제거 작업이 필요하다. 블레이드 형상에서 날개의 길이 방향 단면의 프로파일은 매우 완만한 곡선이며 공구 형상에 비해 곡률이 상대적으로 매우 작기 때문에 길이 방향으로의 간섭을 고려하지 않아도 된다. 따라서 단면 프로파일을 이용하여 블레이드 형상의 가공 경로를 산출하는 경우 heel angle만을 수정하여 간섭을 피할 수 있다. 실제로 간섭 체크는 각 단면의 프로파일의 개수만큼 실시되는데 하나의 프로파일에 고정된 heel angle이 산출 될 수도 있다. 이러한 경우 블레이드 날개방향의 곡률 변화는 심하지 않으므로 비슷한 heel angle값으로 전체 곡면의 가공이 이루어질 것이다.

플랫 엔드밀을 이용하여 블레이드 곡면을 가공할 때 곡면의 법선 벡터 방향과 공구 축벡터를 일치시켜(즉, heel angle=0) 가공하면 간섭이 발생할 수 있다. Fig. 7(a)는 프로파일의 법선 벡터와 공구 축벡터가 일치하는 경우의 공구 자세를 보인 것이다. 이와

같이 heel angle을 0값으로 하여 가공을 하는 경우 공구 제적은 Fig. 7(b)와 같은데 오목한 부위의 공구 간섭을 볼 수 있다.

공구 간섭은 공구의 자세를 변화하여 피할 수 있는데 블레이드 형상의 경우 날개의 길이 방향으로의 상대적으 로 더 작은 곡률을 가진다. 따라서 날개의 단면 프로파일을 공구 경로로 이용하고 단면 프로파일과 공구와의 간섭을 제거해 주면 된다. 공구 자세의 변화는 heel angle을 수정하면 되는데 프로파일 전체에 대해 간섭이 없는 heel angle이 존재하지 않을 수도 있다. 이 경우에는 간섭이 발생하는 각 부위에서 간섭이 없는 heel angle을 다르게 지정하면 된다.

본 논문에서 이용한 블레이드 형상의 경우에는 각 프로파일에서 간섭이 완전히 제거되는 heel angle이 각기 산출되었다. 블레이드 형상의 간섭 제거 과정은 결국 각 CC point에서 적절한 heel angle의 값을 구하는 과정이 된다. 적절한 heel angle이 결정되면 Fig. 8과 같이 간섭이 제거된 공구 경로를 산출할 수 있다. Fig. 8(a)를 보면 heel angle만큼 공구 축 방향이 프로파일의 법선벡터 방향에서 기울어진 것을 볼 수 있다. 이와 같이 수정된 heel angle로 가공할 때의 공구 제적이 Fig. 8(b)와 같은데 heel angle=0일때 경우인 Fig. 7(b)와 비교하면 오목한 부위에서 간섭이 없음을 볼 수 있다.

### 3.4 간섭 제거를 위한 heel angle의 산출 (CL데이터)

간섭이 제거된 heel angle범위는 공구의 형상을 고려하여 공구 자세가 변화할 수 있는 범위의 최소값과 최대값을 구하면 된다. 단면 프로파일은 공구 끝점이 지나는 위치이므로 그 끝점을 고정하고 공구가 취할 수 있는 자세 즉, heel angle의 범위를 구하는 것이다. 프로파일의 모든 구간에서 간섭 제거된

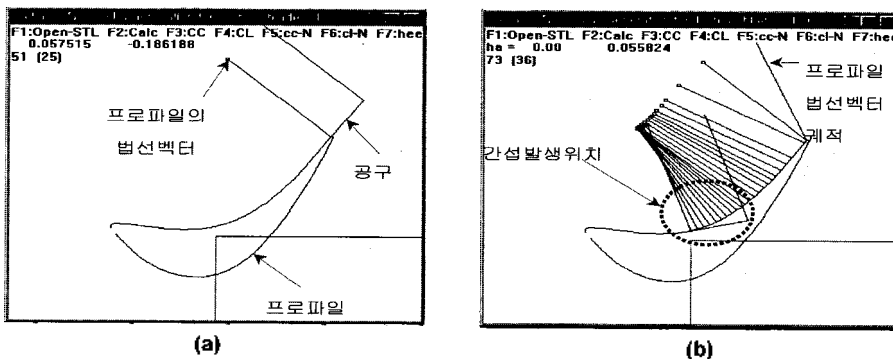


Fig. 7. Example of interference in 5-axis machining of a turbine blade (heel angle  $\theta=0$ ). (a) flat-end cutter and blade profile (b) interference between cutter and profile

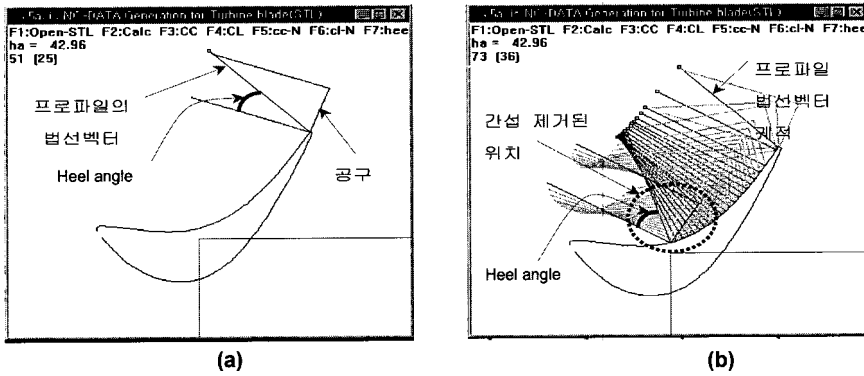


Fig. 8. Example of interference-free tool-path in 5-axis machining of a turbine blade (heel angle  $\theta$ =auto detected). (a) flat-end cutter and blade profile (b) interference-free cutter location

heel angle 범위가 구해지면 프로파일의 각 구간에서 범위 안의 heel angle을 적절한 기준으로 선택하면 된다. 예를 들어 범위 내에서 초기 heel angle에 가장 근접한 heel angle이나 범위의 중간 값 정도의 heel angle을 선택할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 프로파일 점렬의 각 점에서 간섭 제거된 heel angle의 범위에서 적절한 heel angle을 결정할 때 세가지 방법을 사용하였는데, (1) 먼저 일정한 heel angle이 적용하는 방법이고, (2) 두번째로 초기 heel angle을 모두 적용한 다음 간섭이 있는 부분에서만 heel angle을 수정하는 방법, (3) 마지막으로 연속하는 각 점에서 heel angle의 변화가 적도록 간섭 제거된 heel angle의 범위에서 적당한 각도를 선택하는 방법이다. 블레이드의 단면 형상에 따라 다르겠지만 본 연구에서 적용한 블레이드 형상의 경우에는 한 단면의 프로파일에 대해 공구 간섭이 없는 일정한 heel angle을 산출할 수 있었다.

예를 들어 Fig. 9와 같은 프로파일 곡선을 따라 공구가 시계반대 방향으로 진행하며 가공을 한다고 하자. 프로파일은 실제로 블레이드의 가공 위치를 순서가 있는 점렬로 보관하고 있을 것이다. 프로파일 상의 모든 위치는 Fig. 9(a)나 Fig. 9(b)와 같이 현재 가공 위치를 기준으로 공구 진행 방향인 '앞쪽' 방향과 공구 진행 방향의 반대인 '뒤쪽' 방향의 가공 위치로 구분할 수 있다. Fig. 9(a)는 현재 가공 위치를 시작으로 하고 앞쪽의 가공 위치를 끝점으로 하는 방향의 반직선을 그린 것이다. 이 반직선 중에서 프로파일과 접하는 방향 벡터를 보관한다. 같은 방법으로 Fig. 9(b)와 같이 '뒤쪽'으로도 방향 벡터를 구해 보관한다. 이 두 방향 벡터를 현재 가공 시작위치에 놓고 연장하여 그리면 Fig. 9(c)처럼 간섭에 자유로

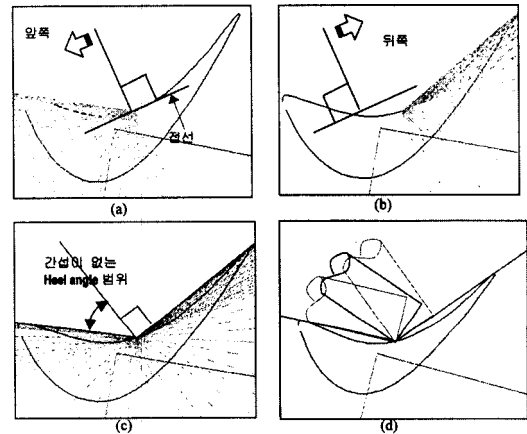


Fig. 9. Auto-detection of inference-free heel angle of cutter. (a) forward detection (b) backward detection (c) feasible range of heel angle (d) auto-detected feasible cutter orientation.

운 heel angle값의 범위를 구할 수 있다.

간섭에 자유로운 heel angle의 범위가 Fig. 10(a)와 같을 때 이 범위를 결정하는 앞쪽과 뒤쪽의 두 방향 벡터는 Fig. 10(b)와 같이 공구 진행 방향 벡터와 공구 축벡터의 외적인 벡터  $v$ 를 구하면 각 프로파일 점렬과의 간단한 벡터 연산으로 쉽게 구할 수 있다.

프로파일의 각 점 위치를 이용하면 방향벡터를 구할 수 있는데 예를 들어 Fig. 10(c)와 같이  $t$ 가 공구 진행 방향 벡터이고  $n$ 은 곡면의 법선벡터이며  $u$ 가  $v$ heel angle만큼 틸팅된 공구의 축 벡터 그리고  $i$ 번째 점 위치인  $C_i$ 라고 하자. 이때  $C_i$  위치에서 간섭이 없는 heel angle 범위의 시작 각도와 끝 각도를 실제로 구하는 방법을 프로그램으로 표현하면 다음과 같다(Fig. 10(d)참조).

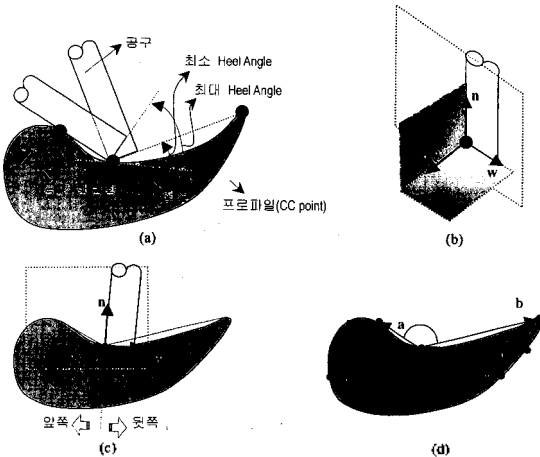


Fig. 10. Calculation of feasible range of heel angle by directional line from CC point to another point on profile.

$$f = C_{i+1} - C_i = C_{ahead(i)} - C_i$$

$$w = f$$

$$v = n \times f$$

$$k = ahead(i) \quad /* \text{공구 진행방향 측, } k=i+1 */$$

$$a = C_k - C_i$$

while (k != back(i)) {

$$k = ahead(k)$$

$$c = C_k - C_i$$

if (c · f < 0) then break; /\* 앞쪽 아니면 멈춤 \*/

if (a × c) · v < 0 then a = c

$$k = back(i) \quad /* \text{공구 진행 반대방향 측, } k=i-1 */$$

$$b = C_k - C_i$$

while (k != ahead(i)) {

$$k = back(k)$$

$$c = C_k - C_i$$

if (c · w < 0) then break; /\* 뒤쪽 아니면 멈춤 \*/

if (b × c) · v > 0 then b = c

}

$$t = a \times v$$

if (b × w) · v < 0

$$\text{heel\_angle}_{\min} = 0 \quad /* \text{둔각의 처리} */$$

else

$$\text{heel\_angle}_{\min} = \arccos(w \cdot b / |w||b|)$$

$$\text{heel\_angle}_{\max} = \arccos(t \cdot b / |t||b|)$$

3.5 기구적인 문제에 의해 야기되는 과절삭의 방지  
일반적인 5축 NC기계에서 회전축 운동이 포함된

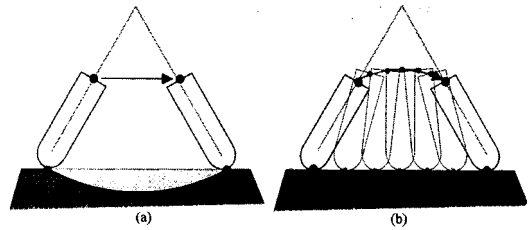


Fig. 11. Example of over-cut by linear interpolation of 5-axis tool path.

직선운동(G01)인 NC블록의 공구 끝 움직임은 선형적인 변화를 하지 않는다. 5축 NC기계는 각 축의 모터의 운동에 대한 보간 기능만을 하므로 선형 이동과 회전 이동을 동시에 하는 경우 공구 끝점에서는 과절삭이 발생할 수 있다. 예를 들어 Fig. 11(a)와 같이 공구 끝점에서의 직선 경로를 원하지만 회전축에서 큰 각도의 회전이 있으면 과절삭이 발생하게 된다. 이는 공구가 직선이동을 할 때 회전 이동이 동시에 발생하기 때문이다. CC point의 궤적이 직선이 되게 하기 위해서 CL데이터의 경로를 주어진 공차를 만족하는 미소 구간으로 나누어 처리하여 끝점의 궤적이 직선에 근접하게 할 수 있다<sup>[4]</sup>. 즉 Fig. 11(b)와 같이 허용 오차를 만족하도록 두 CC point 사이에 새로운 CC 데이터를 추가하는 것이다<sup>[2]</sup>. 두 CC point 사이에 추가되는 CC point는 두 점 사이를 선형 보간하여 구하면 된다.

#### 4. 블레이드의 5축 가공 데이터 생성

##### 4.1 NC데이터의 생성

가공 위치와 공구 축벡터의 방향이 결정되면 5축 기계의 기구적 구조에 적절한 NC데이터를 구해야 한다. 본 논문에서 적용한 블레이드 가공을 위한 5축 기계에는 Fig. 12와 같은 기구적 구조를 가지고 있는데 선형 이동하는 X,Y,Z축과 블레이드를 회전하는 A축 그리고 공구가 텨팅하는 B축 등으로 구성되어 있다.

공구 간섭이 제거되어 산출된 heel angle에 의해 구해진 공구 축벡터  $u$ 와 가공 위치  $P$ 가 주어지면 5축 기계의 기구적 구조에 맞는 역기구학 계산 방법에 의해 NC데이터의 생성이 가능하다. 식 (4)에서 구한 CL point의 좌표를 실제 공구가 가공하는 끝점 위치인  $P(px, py, pz)$ 로 생각하고 heel angle이 적용된 공구 축벡터  $u(ux, uy, uz)$ 를 이용하면 기계의 기구적 구조에 맞는 역기구학 계산에 의해 NC기계에 지령



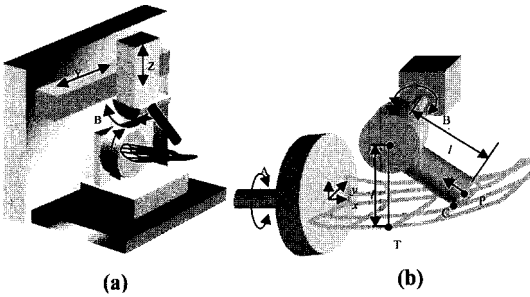


Fig. 12. Schematic of the 5-axis milling machine for machining turbine blade. (a) coordinate system of the machine (b) geometry for inverse-kinematics.

할 X, Y, Z축의 값  $T(x, y, z)$ 와 A, B축의 각도  $a, b$ 를 산출할 수 있다.

Fig. 12(a)는 본 논문에서 가공 데이터 산출을 위해 적용한 5축 기계의 구조인데 B축의 회전 테이블에 블레이드를 장착하고 공구는 A축 방향으로 틸팅된다. NC 데이터의 각 축의 값은 기계의 기구적 구조에 따라 달라지는데 적용된 5축 기계의 기구적 구조는 Fig. 12(b)와 같다. 관련된 역기구학 식은 식 (5)와 같이 구할 수 있는데 행렬로 표현하면 (6)과 같다.

$$T = PRotX(a)Trans(d, 0, l \cdot ux - l) \tag{5}$$

$$(x \ y \ z \ 1) = (px \ py \ pz \ 1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & \sin a & 0 \\ 0 & -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ d & 0 & l \cdot (ux - 1) & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

단,  $b = \text{atan2}(nx, d)$  (여기서,  $d = \sqrt{uy^2 + tz^2}$ )

$a = \text{atan2}(uz, uy)$

$l$  : 회전축에서 공구끝까지의 거리

$P(px, py, pz)$  : heel angle을 반영한 공구 끝점 위치

$u(ux, uy, uz)$  : heel angle이 반영된 공구 축벡터 (단위벡터)

### 4.2 이송 속도의 수정

본 논문에서 적용한 5축 기계는 NC컨트롤러로 FANUC 15M을 사용하는데 Table 1에서 보듯이 각 축의 이송 속도를 구할 때는 선형 이동이나 회전 이동에 관계없이 거리 1 mm를 각도 1도와 대응하는

Table 1. Unit of the F value in feed per minute and feed per rotation (FANUC 15M)

	Feed/Min(G94)		Feed/Rot(G95)
F41(*1)	0	1	-
Valid range	F1~F24000	F1~F24000	F1~F50000
Linear axis	1 mm/min	0.1 mm/min	0.01 mm/rev
Rotation axis	1 deg/min	0.1 deg/min	0.01 deg/rev

등의 방법으로 주어진 이송비에 대한 각 축의 이송 속도를 구한다<sup>8)</sup>. 따라서 5축 가공과 같이 선형 이동과 회전 이동이 있는 경우에 공구 끝점에서의 이송 속도를 일정하게 하려면 각 NC블럭마다 이송비를 다르게 지령해야한다.

두 점간의 이동을 위해 5축 기계에 지령하는 NC 데이터의 X, Y, Z, A, B축의 값이 각각  $x, y, z, a, b$  이고 주어진 이송비가  $F_0$  일때 5축 NC컨트롤러에서 이송 시간  $t_0$ 을 구할 때 이용하는 거리  $L_0$ 은 식 (7)과 같이 계산되고 따라서 가공하는 동안의 이송시간  $t$ 은 식 (8)과 같이 구할 수 있다. 단, 각 좌표 값은 상대좌표 값이다.

$$L_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + b^2} \tag{7}$$

$$t_0 = L \frac{L_0}{F_0} \tag{8}$$

실제 거리  $L$ 을 이동할 때 CNC컨트롤러는  $L_0$ 에 의해 계산된 이용하여  $t_0$ 의 시간을 이용하여 각 축의 이송 속도를 결정한다. 그러나 공구 끝이 이동하는 두 점의 실제 거리인  $L$ 은  $L_0$ 와 다르며 형상 모델의 좌표계에서 구할 수 있다. 주어진 이송비  $F_0$ 로 거리  $L$ 을 이동할 때 걸리는 시간  $t$ 는 식 (9)와 같다.

$$t = \frac{L}{F_0} \tag{9}$$

이때 실제 거리  $L$ 만큼 가는데  $F_0$ 의 이송비를 유지 하려면  $L$ 에 해당하는 시간  $t$ 를 이용하여 수정된 이송비  $F$ 를 해당하는 NC블럭에 적용하면 된다. 즉 같은 거리를 이동하는데 시간이 짧아지거나 길어진 만큼의 비율을 주어진 이송비에 곱해주면 같은 이송 속도를 가지는 새로운 이송비가 산출되는 것이다. 주어진 이송비  $F_0$ 와 식 (8)과 식 (9)에서 구한  $t$ 와  $t_0$ 의 비율로 새로운 이송비  $F$ 는 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$F = F_0 \frac{t_0}{t} \tag{10}$$

이처럼 기계의 축 이송 값이 아닌 CC point상에서 일정한 이송 속도를 유지하기 위한 NC가공 데이터의

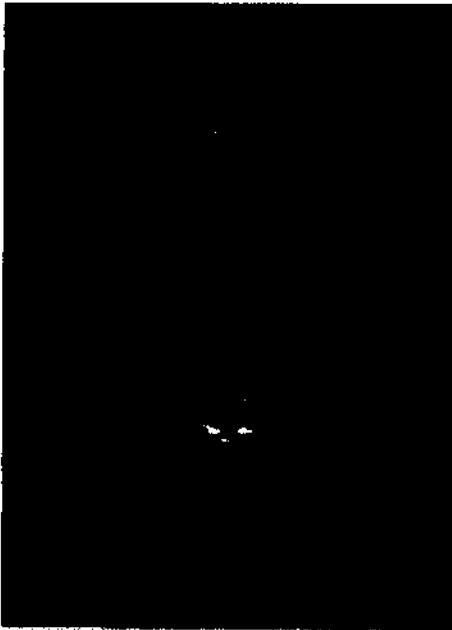


Fig. 13. Photograph of a machined turbine blade by proposed methods.

이송비를 구할때는 이미 5축 기구적 구조에 맞는 CL데이터가 산출된 후 형상 모델 상의 CC데이터를 이용해 구해야 한다.

#### 4.3 적용 결과

제안된 방법에 의해 산출된 간섭 제거된 공구 경로와 일정한 절삭 속도를 유지하는 이송비를 적용하여 생성된 가공데이터를 이용하여 가공한 결과의 예를 Fig. 13에서 보이고 있다. 본 논문에서 개발된 시스템은 일본 H사의 터빈 블레이드 가공에 사용 중이다. 본문에서 보이는 그림에서는 프로파일 법선 등이 매우 듬성하게 있지만 실제로 가공 데이터를 산출하기 위한 다면체 모델은 공차를 만족하도록 매우 작은 삼각형으로 이루어져 있고 단면의 프로파일도 거의 곡선에 근사하도록 매우 촘촘하게 산출된다.

각 단면의 프로파일을 저장하는 메모리는 가공 경로의 계산이 끝나면 불필요하므로 큰 메모리가 필요 없고 간섭 제거가 간단하여 매우 신속하게 가공 데이터가 산출되었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 터빈 블레이드의 5축 가공 데이터를 산출하는 효율적인 방법을 제안하였다. 일반적으로 이용되는 5축 가공의 간섭제거는 매우 복잡하고 시간이 많이 소요되는데 제안된 방법은 블레이드 형상의 특징을 이용하여 매우 신속하게 간섭제거와 간섭 제거된 heel angle에 의한 가공 경로의 산출이 이루어진다. 그리고 실제 5축 기계에서 일정한 절삭 속도를 유지할 수 있는 이송비를 계산하여 NC데이터를 생성하도록 하여 가공 직전 단계까지의 가공 데이터를 산출하도록 하였다.

특히 가공 데이터 산출을 위한 블레이드 형상 모델로 다면체를 이용하였는데 다면체 모델은 VRML이나 STL 포맷 등으로 개방되고 매우 단순한 형식이기 때문에 제안된 방법은 매우 범용으로 적용되리라 기대된다.

## 참고문헌

1. Susan X. Li and Robert B. Jerard, 5-axis Machining of Sculptured Surfaces with a Flat-end Cutter, *Computer-Aided Design*, Volume 26 Number 3, March 1994.
2. 박정환, 금형의 5축 NC가공을 위한 CAM시스템 개발에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위 논문, 1995.
3. 이철수, 자동차 타이어 모델의 곡면 모델링 및 5축 NC 가공, *산업공학(IE-Interface)*, 제 9권 제 2호, 1996. 7.
4. Yunching Huang and James H. Oliver, Integrated Simulation, Error Assessment and Tool Path Correction for Five-Axis NC Milling, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 14 Number 5, 1995.
5. Robert V. Fleisig and Allan D. Spence, Integrated Digitizing, Path Planning and Five-Axis Machining for the Refurbishment of Compressor and Turbine Blade, *Manufacturing Science and Technology*, MED-Vol. 6-1 Volume 1, ASME 1997.
6. Suh, S.H. and Lee, K.S. "Avoiding Tool Inference in 4-axis NC Machining of Rotationally free Surfaces", *IEEE Trans on Robotics & Automation*, 8(6), 1992.
7. 조현덕, 자유곡면을 위한 5-축 정밀 가공에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문, 1993.
8. FANUC Ltd., *FANUC Series 15MA Operators Manual (programming) for Machining Center*, 1997.



**이 철 수**

1984년 한양대학교 산업공학과 학사  
1986년 한국과학기술원 산업공학과 석사  
1990년 한국과학기술원 산업공학과 박사  
1990년 ~ 현재 전남대학교 산업공학과  
부교수  
관심분야 : CAD/CAM과 CNC 콘트롤러



**박 광 렬**

1993년 전남대학교 산업공학과 학사  
1997년 전남대학교 산업공학과 석사  
1997년 ~ 현재 전남대학교 산업공학과  
박사과정  
관심분야 : CAD/CAM, Graphic Simu-  
lation