

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 35 卷 第 2 號 1998年 5月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 35, No. 2, May 1998

## 프로펠러 5축 가공을 위한 CAD/CAM 시스템

윤재웅\*, 박종환\*\*

### CAD/CAM System for 5-Axis Machining of Marine Propeller

by

Jae-Woong Youn\* and Jong-Hwan Park\*\*

#### 요 약

본 연구에서는 공동수조(Cavitation Tunnel) 실험용 모형프로펠러의 5축 가공을 위해 Windows NT와 PC 환경하에서 작동하는 CAD/CAM 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 그 성격에 따라 크게 4가지의 모듈로 구성되어 있다. 먼저, 프로펠러 설계를 위해 기존에 사용하고 있던 텍스트 위주의 S/W(Text based S/W)를 그래픽화 하여 통합함으로써 설계의 효율을 향상시켰다. 설계의 결과로 출력되는 점 데이터는 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 방법을 이용하여 복합곡면(Composite Surface)으로 모델링하였고 가공은 황삭, 중삭, 정삭 및 잔삭으로 수행하였다. 각각의 경우에 있어서 공구와 공작물의 충돌 및 간섭을 체크하여 공구경로를 산출하였으며 그것을 역기구학 해석하여 NC 데이터로 변환하였다. 또한, 가공의 상태를 화면상에서 검증하기 위해 공구 및 공작물을 그래픽화하여 NC 데이터를 검증할 수 있도록 하였다. 끝으로 5축 가공의 가공 효율을 최대화하기 본 연구에서는 공동수조 실험용 모형프로펠러의 5축 가공을 위해 Windows NT와 PC 환경하에 실험을 통하여 최적의 절삭조건을 선정하고 이를 시스템내에 데이터베이스화 함으로써 설계부터 가공까지를 자동으로 수행할 수 있는 시스템으로 구축하였다.

#### Abstract

In this paper, a CAD/CAM system for 5-axis machining of model propeller is introduced. This system has been developed under the environment of personal computer and Windows NT. In order to enhance the productivity, existing text-based design S/W was integrated into this graphic-based system. Non-Uniform Rational B-Spline method is used to represent the

---

접수일자 : 1996년 6월 3일, 재접수일자 : 1998년 5월 14일

\*삼성중공업 중앙연구소 메카트로 개발센터

\*\*정회원, 목포대학교 조선공학과

sculptured surface of propeller blades and hub using point data, and surface blending between blade and hub is realized in this system. For 5-axis machining of sculptured surface, tool/work collision and interference are checked and inverse kinematic analysis is performed to make NC data. In addition, tool and workpiece are animated on the PC monitor by preparing NC verification module. Finally, optimal cutting conditions are determined empirically and those cutting conditions are integrated into this S/W so that the whole process from design to machining can be done automatically.

I. 서론

최근 국내에서는 프로펠러, 임펠러 및 터빈 날개 등 고부가가치 제품의 가공을 위한 5축 공작 기계의 사용이 급증하고 있다. 5축 가공을 위해서는 공작기계 뿐만 아니라 이를 이용하여 최적의 가공을 할 수 있도록 하기 위한 소프트웨어의 개발도 이루어져야 한다. 외국의 경우 상품화된 S/W가 있으나 주로 범용시스템이며 고가이다. 또한, 공구경로, 절삭공구, 그리고 가공조건에 대한 최적화 연구가 현재 진행중이나 [1,2,3], 아직 이를 완벽히 지원하는 상용시스템은 없다. 따라서 프로펠러의 가공과 같이 피삭재의 지지부가 극히 제한되고, 가공부위가 가늘고 길며 그 형상도 복잡한 제품의 가공에 있어서는 범용의 시스템보다는 전

용시스템의 개발이 무엇보다도 중요한 일이라 할 수 있다 [4]. 이러한 전용시스템의 장점은 먼저 제품의 형상모델링을 위한 프로그래밍 작업량을 현격하게 줄일 수 있고, 제품의 초기소재로부터 최종 형상까지 가공하기 위한 작업계획, 공구선정, 공구경로 창성, 절삭조건 산출 그리고 시험절삭 등으로 이루어지는 일련의 전문가 의존성 작업들을 자동으로 수행하게 할 수 있다는 점이다.

서로 직교하는 3개의 평행이동축으로 구성된 3축 공작기계에 비하여, 5축 기계는 일반적으로 2개의 회전축을 더 갖고 있으며 각 축의 구성은 그 용도에 따라 다양하다. 부가된 2개의 축으로 증가된 2개의 자유도는 공구의 축방향을 변화시키는데 이용된다. 즉, 3축계에서는 곡면상의 접촉점이 주어지면 공구의 위치가 유일하게 결정되는 반

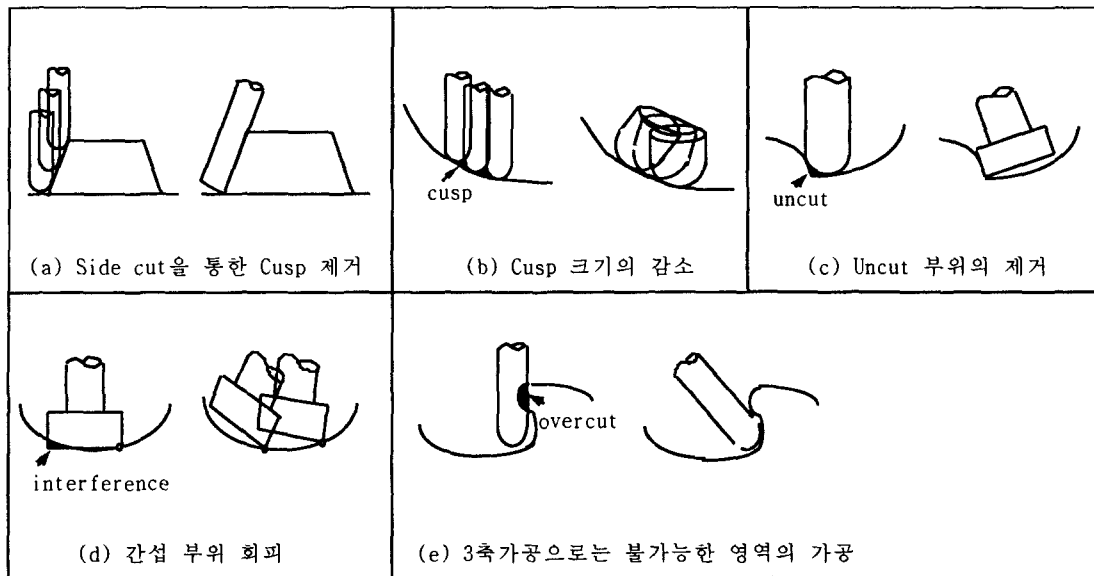


Fig. 1 Advantages of 5-axis machining

면, 5축 기계에서는 공구의 여러 가지 자세(위치 및 축방향)를 취할 수 있다. 일반적으로 3축 기계와 비교할 때 5축 기계는 Fig. 1과 같이 많은 장점을 가질 수 있으며 특히, 프로펠러와 같이 날개의 겹침으로 인해 간섭부위가 존재하는 공작물은 3축으로는 가공이 거의 불가능하다.

자유곡면(Free-form surface or Sculptured surface)의 5축가공은 가공기술의 난이성으로 인해 학문적으로도 최적의 공구자세의 결정, 공구/공작물의 충돌(Collision) 및 간섭(Interference) 방지, 최적 절삭조건 선정, 제품의 정밀도 향상등에 관한 연구가 계속되고 있으며 [5], 국내에서도 이러한 연구가 점차 확산되고 있는 상태이다 [6]. 또한, 5축 가공의 적용에 있어서는 최근 범용의 CAD/CAM 시스템들이 5축 가공 모듈을 개발하여 적용을 시작하고 있는 단계이고, 국내의 몇몇 기업들이 이러한 범용시스템을 도입하여 5축가공을 시도하거나, 대학과 공동연구를 수행하여 5축가공의 일부 시스템을 독자적으로 개발하려 하고 있으나 하나의 통합된 시스템으로서 전용 혹은 범용의 CAD/CAM 시스템을 개발한 예는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 프로펠러의 5축가공 전용 CAD/CAM 시스템의 개발 및 가공을 위해 먼저, 5축 공작기계의 재구성(Retrofit)을 시도하였고, 프로펠러 설계 S/W와 CAD/CAM 시스템과의 통합, 곡면 모델링, 공구경로 생성, NC 데이터 변환(Post-Processing), 공구경로 검증, 공구/공작물 충돌 및 간섭 체크, 그리고 가공 테스트를 통한 최적 절삭조건 선정등을 수행하였다.

## II. 프로펠러 설계 S/W의 통합

설계 S/W의 통합은 기존의 프로펠러 설계 공정에서 반복되는 비효율적인 작업 방식을 하나의 단일화된 S/W로 통합함과 동시에 이를 통해 얻어지는 설계 데이터를 직접 CAM 시스템의 입력으로 연결시킴으로써 설계와 가공 공정의 통합된 작업환경을 구축하는 것을 목적으로 하고 있다.

일반적으로 프로펠러를 설계하기 위한 작업공정

은 일련의 수작업을 동반함과 동시에 만족하는 데이터가 나올 때까지 반복해야하는 작업이라는 점, 또한 단일한 S/W가 아닌 각기 다른 S/W를 이용한다는 점에서 많은 시간과 노력이 소모된다. 이런 작업 환경을 개선하기 위해 설계 S/W의 통합은 다음과 같은 점을 고려하여 구현되었다.

- 성능지수 검증을 위한 그래프의 자동 생성
  - 성능지수 수정의 간편화
  - 모든 공정을 하나의 통합된 환경에서 제공
  - 프로펠러 CAM 시스템과의 통합환경 제공
- 설계 S/W의 통합 작업을 도시하면 Fig.2와 같다.

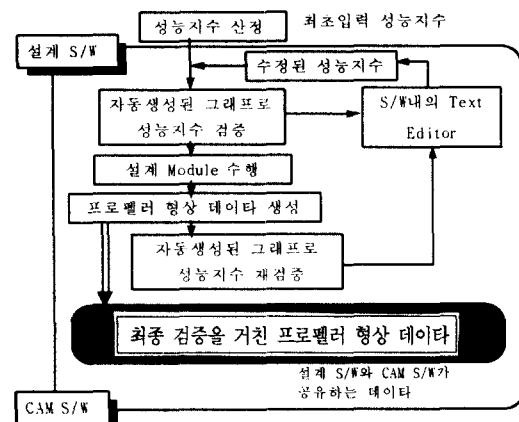


Fig. 2 Flowchart for propeller design module

설계 S/W의 개발은 기존 텍스트 위주(Text-based) 설계 S/W의 핵심 코드(Code)는 변경이 없이 다른 모듈과의 연결코드(Interface Code)만을 추가시키고 작업환경을 통합하는 새로운 기능들을 추가하는 차원에서 이루어졌다. 새롭게 개발된 설계 S/W는 독자적으로 수행되는 단일 S/W일 뿐만 아니라 CAM S/W와 함께 수행되는 통합 S/W의 한 모듈이기도 하다. 따라서 본 연구에서는 설계에서 가공까지의 전 공정을 보다 효율적으로 하나의 통합된 환경하에서 가능하도록 하였다. Fig.3은 프로펠러의 설계성능을 계산하여 그래프로 처리하는 본 시스템을 보여주고 있다.

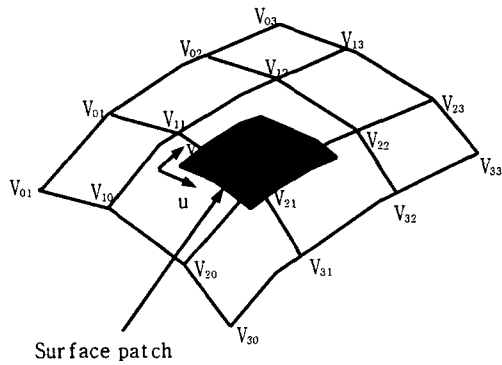


Fig. 3 Non-Uniform B-Spline Patch

III. 곡면모델링

1. 프로펠러 날개(Blade)의 모델링

A. NURBS 모델링

본 연구에서는 선박용 프로펠러 5축 가공을 대상으로 매개변수 곡면모델(Parametric Surface Modeling) 방법중 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 모델링 방법을 이용하였다. 프로펠러 설계 모듈에서 생성된 점 데이터(Point Data)는 곡면모델링되고 모델링된 정보를 이용하여 가공을 수행하게 된다. 따라서 곡면모델링은 자유곡면의 가공에 있어서 가장 기본이 되면서 중요한 공정이라 할 수 있다.

패치(Surface Patch)를 기본으로하는 매개변수 곡면모델링은 기본적으로 데이터 점군(Array)으로부터 사각형의 곡면 패치를 만들어 합성하는 방법이다. 이 중 NURBS 방법은 일반적 방법으로서 프로펠러의 날개와 같이 점군이 불균일한 곡면의 경우에 특히 모델링의 정밀도를 높일 수 있다는 장점을 갖고 있다.

Fig.3과 같이 하나의 곡면 패치에 대해 16개의 제어점(Control Vertices,  $\{V_{ij}, i,j=0,1,2,3\}$ )과 두개의 노트스팬(Knot span) 벡터 $\{\Delta_i\}$ 와  $\{\nabla_j\}$ 를 갖는 Bicubic NUB(Non-Uniform B-Spline)패치는 임의의 점 데이터군과 양 끝단에서의 접선벡터(Tangent Vector)를 알고 있다면  $C^2$  연속성을 만족하는 다음과 같은 형태로 정의할 수 있다 [7].

$$r(\mu, \nu) = UN_s B^j N_t^T V^T$$

$$U = [1 \ u \ u^2 \ u^3] : \text{parameter}$$

$$V = [1 \ v \ v^2 \ v^3] : \text{parameter}$$

$$B = \begin{bmatrix} V_{i,j} & V_{i,j+1} & V_{i,j+2} & V_{i,j+3} \\ V_{i+1,j} & V_{i+1,j+1} & V_{i+1,j+2} & V_{i+1,j+3} \\ V_{i+2,j} & V_{i+2,j+1} & V_{i+2,j+2} & V_{i+2,j+3} \\ V_{i+3,j} & V_{i+3,j+1} & V_{i+3,j+2} & V_{i+3,j+3} \end{bmatrix}$$

: control vertices

$N_s$  : coefficient matrix with knot spans  $\Delta_i$

$N_t$  : coefficient matrix with knot spans  $\nabla_i$

B. 노트스팬(Knot Span)의 결정

주어진 데이터 점군에서 노트스팬은 각각, u 방향과 v 방향의 곡선길이(Chord length)에 비례하며 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉 u-방향의 노트스팬은

$$\Delta_i = \sum_{j=0}^m |P_{i+1,j} - P_{i,j}| \text{ for } i=0, 1, \dots, m-1$$

과 같이 되며, v-방향의 노트스팬은

$$\nabla_j = \sum_{i=0}^m |P_{i,j+1} - P_{i,j}| \text{ for } j=0, 1, \dots, n-1$$

과 같이 된다. 또한 점군의 양 끝단에서 확장된 노트스팬은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta_{-2} = \Delta_{-1} = 0 = \Delta_m = \Delta_{m+1}$$

$$\nabla_{-2} = \nabla_{-1} = 0 = \nabla_n = \nabla_{n+1}$$

C. 양단 접선벡터(End Condition)의 결정

앞에서도 언급한 바와 같이 곡면의 모델링을 위해서는 점군(Point group)과 양끝단에서의 접선벡터(Tangent vector)를 알고 있어야 한다. 그러나 일반적으로 곡면을 모델링할 때 사용자가 일일이 그것을 입력한다는 것은 그리 간단한 문제는 아니다. 따라서 본 연구에서는 프로펠러의 형상에 맞게 경우에 따라 원호 보간에 의한 접선벡터(Circular end condition) 결정과 자유단의 조건을 이용한 접선벡터(Free end condition)의 결정을 자

동적으로 사용하게 하였다.

먼저 원호 보간에 의한 접선벡터 결정은 각 점들의 양 끝단에서 Fig.4와 같이 원을 이룬다는 가정으로 그 접선벡터를 계산하는 방법이다. 즉,

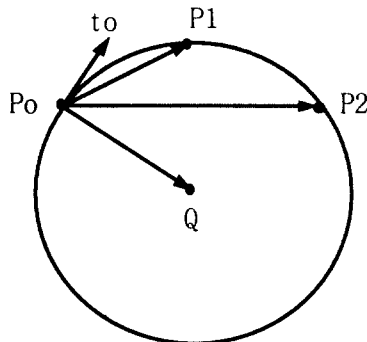


Fig. 4 Calculation of end tangent vector in Circular end condition

$$t_0 = |a|(rxc) / |rxc|$$

이 때 벡터  $r = Q - P_0$  의 계산은

$$r = \{ |a|^2(bxc) + |b|^2(cxa) \} / (2|c|^2),$$

$$a = P_1 - P_0, b = P_2 - P_0, c = axb$$

이 된다. 한편, 자유단의 조건을 이용한 접선벡터 결정은 각 끝단에서의 곡률(Curvature)을 0 으로 셋팅하여 계산한다. 즉,

$$r''(0) = 0, \quad r''(1) = 0$$

이 되고, 그 결과 끝단의 접선벡터는 다음과 같이 계산된다.

$$2t_0 + t_1 = 3(P_1 - P_0)$$

$$2t_n + t_{n-1} = 3(P_n - P_{n-1})$$

#### D. 프로펠러 날개(Blade)의 모델링

프로펠러 날개 곡면의 모델링은 크게 앞면과 뒷면으로 나뉘어 모델링된다. 이것은 가공을 고려하

여 날개의 앞, 뒷면을 구분해 줌으로써 차후에 황삭, 및 정삭가공을 곡면의 특성에 맞게 분할하여 만들기 위해서이다. 모델링된 곡면은 주어진 날개 갯수 만큼 앞, 뒤면 각각 복제되어 화면상에 나타나게 된다. 곡면의 모델링은 11 X 41개의 점군으로 주어지고 이것은 S/W 내부에서 다시 11 X 21개의 두면에 대한 정보로 나뉘어 각각 모델링된다.

## 2. 프로펠러 허브(Hub)의 모델링

프로펠러 허브(Hub)의 모델링은 기본적으로 주어진 허브데이터를 Z 축에 대해 회전시켜 구하는 스위프 곡면모델링(Sweep Surface Modeling) 방식을 취함으로써 모델링할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 허브 곡면의 모델링 자체를 가공의 관점에서 고려함으로써 불필요한 곡면의 모델링을 최소로 하였다.

Fig.5에서 보는 바와 같이, 프로펠러의 허브는 날개면의 시작점을 공유하고 있다. 앞에서 정의한 날개의 앞면과, 뒷면을 일정각도( $2\pi/\text{No. of blade}$ ) 회전시켜 그 사이에서 Z 축 방향으로 반지름이 다른 실린더(Cylinder)의 일부로 모델링할 수 있다. 위의 그림에서 주어진 점 데이터는  $P_{0i}$  와  $P_{mi}$  뿐이므로 그 중간의 점 data는, 임의의 Z 높이에서 곡면의 형태가 원호라는 점을 이용하여 보간(Interpolation)함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{xij} = r \cdot \cos(i \cdot \theta / m)$$

$$P_{yij} = r \cdot \sin(i \cdot \theta / m)$$

$$P_{zij} = P_{z_{oj}} + i \cdot \frac{P_{z_{mj}} - P_{z_{oj}}}{m}$$

여기서  $m$  : 보간데이터 갯수

$r$  : 임의의 z 값에서의 허브 실린더의 반지름

날개의 모델링에서는 양단 접선벡터를 모두 원호보간에 의해 면을 만들고, 허브의 경우는 곡면의 특성상 u 방향으로 원호보간을, v 방향으로 자유단 조건을 주었다는 차이를 제외하면 곡면 모델링 방식은 날개와 허브가 동일하다.

### 3. 곡면의 블렌딩(Blending)

Fig.5와 같이 프로펠러의 날개와 허브가 만나는 부분의 블렌딩은 정삭가공시 간섭을 체크하는 기준면이 되므로 가공의 관점에서 함께 고려되어야 한다.

일반적으로 두개의 곡면이 만날 때, 그 두 곡면의 블렌딩은 메쉬생성(Mesh generation), 감지(Detection) 그리고 추적(Tracing)의 세단계로 이루어진다. 이 방법은 일반적인 곡면과 곡면이 만나는 경우의 블렌딩으로서 상당히 복잡하고 계산 시간도 많이 걸린다는 단점을 가지고 있다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 두 곡면의 곡면 블렌딩을 해석적으로 구하는 것은 불가능한 것으로 알려져 있다.

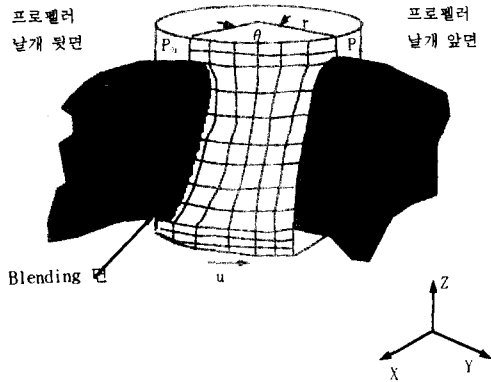


Fig. 5 Surface modeling concept for propeller hub

본 연구에서는 이러한 기능을 수행하기 위해 다음과 같은 가정하에 근사해로서 Surface blending을 수행하고자 한다.

**\* 가정(Assumptions)**

1. 프로펠러의 허브는 국부적으로 그 지름이 다른 실린더의 집합체이다.
2. 곡면상의 임의의 u 방향 곡선에서 곡선의 법선벡터 성분은 0 이다.
3. 프로펠러의 날개면은 그 곡률이 급격하게 변

화하지 않고, 날개의 임의 단면에서 두 점의 차이는 그 곡면의 접선 혹은 법선 벡터를 의미한다.

프로펠러의 날개와 허브의 곡면 블렌딩 공정은 다음과 같다.

**\* BHB(Blade/Hub Blending)계산의 절차**

1. 프로펠러 날개 곡면의 임의의 u 방향 파라미터를 곡선으로 모델링 한다.
2. 그 곡선의 (법선벡터 \* 블렌딩 반지름)과 (허브 원호 + 블렌딩 반지름)의 교차점(Intersection point)을 구한다. 이때, 날개면의 블렌딩 반지름은 Fig. 6에서와 같이  $R' = R/\cos\theta$ 로 계산되어진다.
3. 그때 곡선상의 파라미터 u를 블렌딩 곡면의 날개면 접촉점으로 한다.
4. 허브곡면의 임의 u방향 파라미터를 곡선으로 모델링한다.
5. 모델링된 곡선의 (법선벡터 \* 블렌딩 반지름)과 계산된 교차점이 일치하는 곡선의 파라미터 u를 블렌딩 곡면의 허브측 접촉점으로 한다.
6. 각 곡선에 대해 같은 작업을 수행한다.
7. 계산된 접촉점들을 기준으로 하여 곡면모델링을 수행한다.(허브모델링과 같은 방법)

Fig.7은 이와같이 모델링된 프로펠러 전체 곡면의 모습을 각각 보여주고 있다.

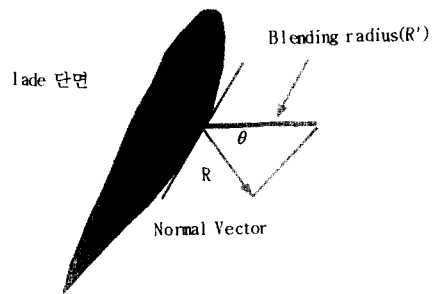


Fig. 6 Calculation of blending radius in the blade cross-section

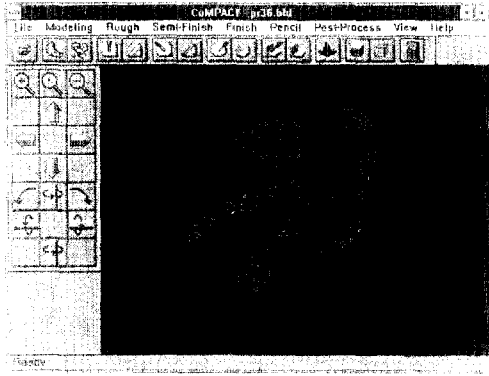


Fig. 7 프로펠러의 Modeling

#### IV. NC 가공 (NC Machining)

가공은 크게 황삭, 중삭, 정삭으로 나뉘어 진행되고 이중 황삭은 가공성을 고려하여 3축가공으로 나머지는 5축가공으로 수행된다.

##### 1. 황삭가공(Rough cut)의 공구궤적

황삭가공은 3축의 포켓(Pocket) 가공 형태로 진행된다. 본 연구에서 수행한 황삭가공 공정의 절차는 다음과 같다.

\* 황삭가공의 절차

1. 날개곡면을 초기 소재 좌표로 변환
2. 가공 깊이의 산출(Z-평면 결정)
3. 날개곡면과 임의의 Z-평면과의 교차곡선 (Intersection Curve) 계산
4. 두 교차곡선에서 가공 피치(Pitch)에 해당하는 공구 위치 선정
5. 계산된 공구위치를 연결하는 공구경로 산출

가공깊이의 산출은 절삭실험으로부터 주어진 절삭깊이(Axial depth of cut)로 기본적으로 산출되나 두번째 황삭가공 즉 초기소재를 뒤집어서 가공하는 경우는 공작물의 강성이 약해지기 때문에 이 점을 고려하여 Fig.8과 같이 절삭깊이가 변하도록 하였다. 여기서 Fig.8과같이 소재의 중간 부분을

작은 절입(Depth of cut)으로 선정한 것은 소재의 윗부분을 가공할 경우에는 공작물의 강성이 비교적 크고 또 아랫부분을 가공할 때에는 프로펠러 날개의 허브 부분쪽을 가공하기 때문에 비교적 강성이 크며, 중간부분을 가공할 때 강성이 가장 약하기 때문이다.

Depth of cut

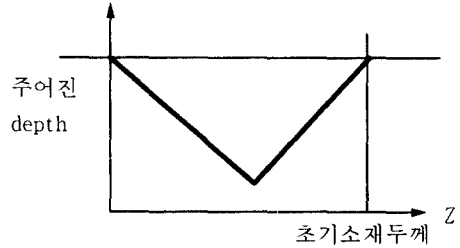


Fig. 8 Change of depth of cut in rough cut

황삭 포켓(Pocket) 가공을 수행하기 위해서는 Fig.9와 같이 곡면과 임의의 Z-평면과의 교차곡선을 계산하여야 한다. 이때 곡면과 평면의 교차곡선은 2-D Jacobian inversion 방법과 뉴턴(Newton)의 방법에 의해 다음과 같은 절차로 구해진다.

\* 2 D Jacobian Inversion 절차

1. 추측점(Guess point) 와 수평선(horizontal line)  $X^* = (x^*, y^*)$ 를 입력
2. 다음과 같은 방법으로  $\Delta u$  와  $\Delta v$  를 계산한다.

$$\Delta u X_u + (\dot{u}, \dot{v}) + \Delta v x_v(\dot{u}, \dot{v}) = x^* - x(\dot{u}, \dot{v})$$

$$\Delta u Y_u + (\dot{u}, \dot{v}) + \Delta v y_v(\dot{u}, \dot{v}) = y^* - y(\dot{u}, \dot{v})$$

3. 추측점의 갱신

$$\dot{u} = \dot{u} + \Delta u, \quad \dot{v} = \dot{v} + \Delta v$$

$$4. (x(u, v) - x^*)^2 + (y(u, v) - y^*)^2 > \epsilon$$

이면 스텝 1부터 반복.

아니면  $u^* = \dot{u}$  and  $v^* = \dot{v}$

위와 같은 방법으로 각 곡면 패치상에서 교차되

는  $u, v$  값들을 찾음으로써 교차곡선을 구하게 된다.

구해진 교차곡선의 법선벡터  $n^*(R+offset)$ 를 계산한 오프셋 곡선(Offset curve)을 구하고 각 피치에 해당하는 공구궤적과 다시 교차되는 점을 찾으면 그것이 공구의 시작점과 끝점이 된다. 계산된 공구궤적의 시작점과 끝점을 연결하는 원호상에서 몇개의 중간값을 보간(Interpolation) 하게 되면 임의의 Z-평면 상에서의 공구궤적을 얻게 된다.

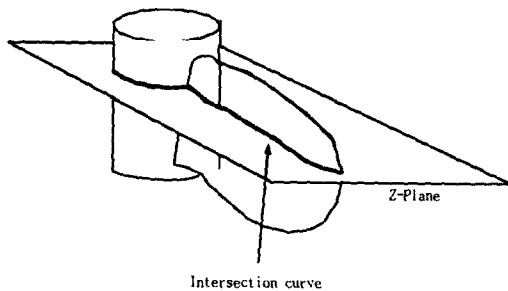


Fig. 9 Intersection curve between blade and constant z-plane

## 2. 정삭가공(Finishing)의 공구궤적

정삭가공은 모델링된 프로펠러 날개와 허브의 데이터로부터 곡면의 일정한 파라미터를 따라 창성(Isoparametric) 하였으며 일반적으로 CC(Cutter Contact) 데이터와 CL(Cutter Location) 데이터로부터 산출된다. 즉, CC 데이터는 모델링된 곡면의 데이터를 의미하고 CL 데이터는 그것으로부터 법선벡터를 고려하여 공구의 반경만큼 공구를 오프셋시켜 다음과 같이 구하게 된다.

$$r_{cl} = r(u, v) + Rn - Ru$$

여기서  $R$  : Tool radius

$$n = (r_u \times r_v) / |r_u \times r_v|$$

정삭가공에서는 현재공구의 위치에서 주어진 공차 이내에서 다음의 공구좌표를 구하는 것이 매우

중요하다. 이는 주어진 가공공차에 맞게 곡면을 가공하기 위해 그 계산이 필수적인 공정이라할 수 있다. 이러한 가공은 주로 선형보간(Linear Interpolation) 방법에 의해 산하게 되고, 허용오차 이내로 가공할 수 있는 최대한의 보간 간격을 구함으로써 가공시간을 단축하고 곡면의 표면조도를 향상시킬 수 있으며, 불필요한 접촉으로 인한 공구의 마모를 줄일 수 있다.

보간길이(Step length)를 구하는 방법으로서, 첫째로 시행착오방법(Trial & Error Method)로서 가공구간을 미세하게 증가시키면서 그때의 가공오차를 계산하는 방법으로 증분에 따라 가공오차가 달라지고 계산속도가 상대적으로 많이 소요되는 단점이 있다. 둘째는, 허용오차가 주어지면 이에 상응하는 보간길이를 예측하는 방법으로 계산속도가 빠르고 균일한 허용공차를 갖는 면을 가공할 수 있다. 본 연구에서는 이 두번째 방법중 외측공차(Out-tolerance)로서 곡면의 허용공차를 산정하는 방법을 사용하였다.

외측공차에 의한 직선보간 방법은 Fig. 10과 같이, 가공경로를 부분적으로 반경이  $\rho$ 인 원호로 가정하고 근사시키는 방법이다. 즉,

$$\alpha = 2 \cos^{-1} \left( \frac{\rho}{\rho + R} \right)$$

$$L = 2 \left( \rho + R \left( 1 - \cos \left( \frac{\alpha}{2} \right) \right) \right) \tan \left( \frac{\alpha}{2} \right)$$

위와 같이 직선보간 길이  $L$ 을 구할 수 있다.

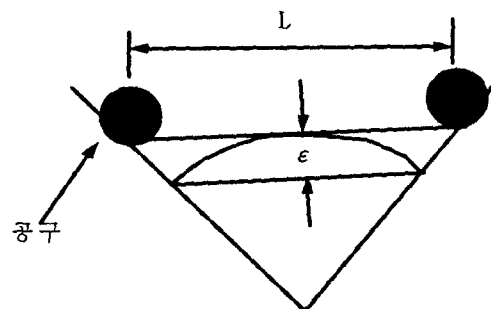


Fig. 10 Linear interpolation of tool paths using out-tolerance method



### 3. 중삭가공(Semi-Finishing)의 공구 궤적

황삭가공이 끝나면, 프로펠러 날개의 상호간섭에 의해 가공되지 않는 영역이 발생하게 되고 이 영역은 가공부위가 깊은 부분이므로 가공성이 떨어지게 된다. 따라서 중삭가공의 궁극적 목적은 황삭가공 간섭에 의해 가공되지 않은 영역을 가공하는 것이다.

중삭가공 영역의 결정은 황삭가공에서 가공되지 않은 부위의 최대높이와 축 중심으로부터의 최대 거리를 황삭가공 공구궤적 계산시 산출하고 그 값을 이용하여 그 값에 해당하는 곡면의 패치를 찾게된다. 이렇게 찾아진 곡면의 정보를 이용하여 정삭가공과 같은 방법으로 가공을 위한 공구궤적을 산출하게 된다.

### 4. 공구/공작물의 충돌 방지

정삭 및 중삭 가공의 경우는 황삭가공과는 달리 5축 가공을 수행하므로 공구/공작물의 충돌방지가 상당히 중요하다. 일반 5축가공에서 공구/공작물의 충돌여부를 체크하기 위해 공구, 공구홀더, 주축 그리고 공작물에 많은 체크점(Check point)을 설정하고 그 점들의 충돌을 체크한다. 이것은 상당히 많은 계산시간을 요하고 충돌이 발생할 경우 공구 축벡터를 어떻게 설정해야 하는지에 대해 대안을 내리기가 어려운 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 이런 5축 가공의 충돌을 효과적으로 체크하고 방지하는 방법에 대해 많은 연구가 수행되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 프로펠러 형상에 착안하여 Fig.11(a)와 같은 체크 벡터(Check vector)를 설정하고 공구가 임의의 곡면상을 이동할 때 이미 계산된 각 체크 벡터를 조사하여 공구의 축벡터를 각 쌍의 체크 벡터내의 임의 위치에 놓음으로써 (Fig.11(b)) 공구/공작물이 충돌하지 않도록 하였다. 체크벡터의 설정 및 충돌방지 절차는 다음과 같다.

#### \* 충돌체크 절차

1. 임의의 Z-평면 상에서 날개곡면의 외곽선과 Z-평면 이 만나는 교차점을 구한다.
2. 교차점을 연결하는 체크 벡터를 n개 계산한다.
3. 이웃하는 다른 날개에 대해 같은 계산을 수행한다.
4. 두 날개에서 계산된 체크 벡터를 동일 Z-평면상에서 쌍으로 인식한다.
5. 임의의 공구궤적에 대해 공구축벡터를 항상 그 시점의 체크 벡터 쌍 내에 위치시킨다.

한 쌍의 체크 벡터에 대해 공구위치는 Fig.11(b)와 같이 가공하는 곡면의 형태에 따라  $\alpha$  와  $\beta$ 를 적절(Adaptive)하게 조절한다.

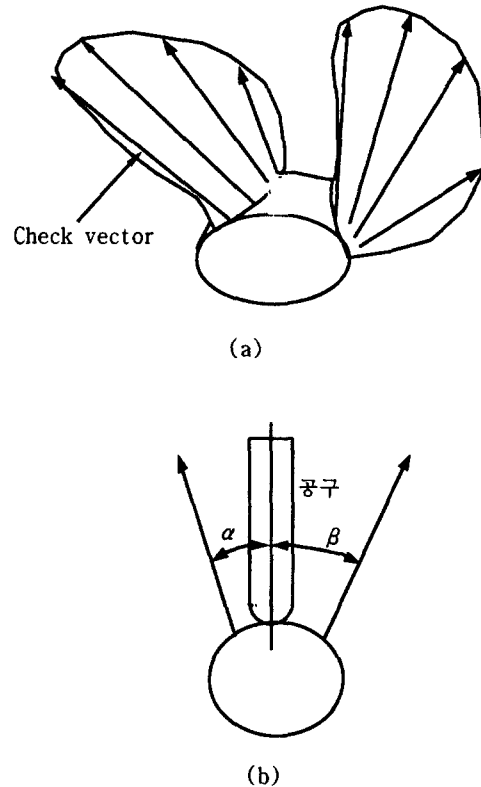


Fig. 11 Definition of check vector for collision avoidance

## 5 공구/공작물의 간섭체크

공구/공작물의 간섭체크는 기본적으로 모델링에서의 블렌딩곡면 이용한다. 이것은 프로펠러의 특징으로서 공구날개와 허브가 만나는 지점에만 간섭부위가 있고 기타 다른 영역에는 공구/공작물의 간섭이 없기 때문이다.

따라서 정삭가공시에 사용하는 공구의 반경으로 프로펠러 날개와 허브를 블렌딩하고 날개와 허브에 각각 임의 곡면패치상에서  $u$ -파라미터에 제한을 두어, 제한된 파라미터내에서만 가공이 일어나도록 하면 간섭체크는 자동으로 수행된다.

## 6. 역기구학(Inverse Kinematics) 해석

공구의 CL 점을  $h=(x,y,z)$ , 공구의 축방향 벡터를  $u=(u_x, u_y, u_z)$ 라 하고 공작기계 각 축(Joint)의 이동량 즉, 각 축의 값을  $X, Y, Z, A, B$ 라 할 때 주어진  $(X, Y, Z, A, B)$ 로부터  $(x, y, z, u_x, u_y, u_z)$  값을 구하는 식을 기구해(Direct kinematic solution)라 하고 그 역을 역기구해(Inverse kinematic solution)라 한다. 간단한 축 구조를 갖는 다축 NC 기계의 경우는 기하학적 방법으로 모델링이 가능하며, 복잡한 경우에는 로봇공학에서 널리 사용되는 "Denavit-Hatzenberg Representation(D-H rep)"을 이용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 사용한 공작기계는 수직형의 기계이므로 공구의 축방향 벡터는 항상  $(0,0,1)$ 로 정의된다. 따라서 공구 충돌을 회피하기 위한 체크 벡터로부터 축방향 벡터가  $(0,0,1)$ 이 되기 위한 회전과 경사각이 계산되면 새로운 CL 점  $h'=(x,y,z)$ 은 좌표변환에 의해 구해진다.

## V. 5축 공작기계의 재구성

서로 직교하는 3개의 평행이동축으로 구성된 3축 공작기계에 비하여, 5축 기계는 일반적으로 2개의 회전축을 더 갖고 있으며 각 축의 구성은 그 용도에 따라 다양하다. 부가된 2개의 축으로 증가된 2개의 자유도는 공구의 축방향을 변화시키는

데 이용된다.

본 연구에서는 3축 공작기계와 2축의 회전/경사 테이블(Index/Tilting Table)을 이용하여 5축의 공작기계로 재구성(Retrofit)하였다. 공작기계는 수직형(Vertical type) 머시닝센터(Machining center)를 선정하고 축의 작동범위 및 회전/경사 테이블과의 충돌여부를 고려하여 공작기계의 설계 변경을 결정하였다. 또한, 5축 동시가공을 위해 공작기계 제어기(Controller)는 Fanuc 15M을 채용하였고, 알루미늄 합금의 가공성을 고려하여 고속주축(10,000 rpm)을 채용하였고, 수직형 공작기계임을 감안하여 회전/경사 테이블의 경사각 제한이  $-110^\circ \sim 110^\circ$  인 회전/경사 테이블을 선정하여 공작기계 테이블의 스트로크(Stroke) 제한, 공구의 간섭 및 충돌등을 체크하였다.

프로펠러는 그 형상의 특이성으로 인해 고정(Clamping)할 위치가 한가지로 제한된다. 즉, 프로펠러의 축을 관통하는 구멍을 이용해 고정해야 하기 때문에 가공의 간섭 및 지그의 강성, 그리고 칩탈이 용이해야 한다. 따라서 본 연구에서는 지그의 강성 및 공구간섭 및 충돌등을 고려하여 지그를 설계하였다.

## VI. 가공(Machining)

### 1. 공구의 선정

프로펠러의 가공은 가공부위가 깊기 때문에 공구의 길이가 길어야 하고, 공작물(프로펠러)이 가늘기 때문에 공구의 휘어짐(Deflection)과 많은 진동을 수반하게 된다. 따라서 공구를 고정하는 공구 홀더(Holder)는 유압척(Hydraulic Expansio Chuck)으로 선정하였다.

한편, 황삭공정은 초기 원판 상태의 소재로부터 포켓팅을 해나가는 형태로 가공이 진행되므로 공구의 선정 역시 이러한 관점에서 고려되어야 한다. 그러므로 깊은 포켓 가공시 긴 공구의 강성을 고려하여 황삭공구는 초경(Solid carbide)을 선정하였고 알루미늄 합금 가공용으로 전문화된 공구를 사용하였다. 정삭 및 중삭가공에서는 인서트 팁

(Insert-tip)을 사용하는 공구를 사용함으로써 공구 재연삭(Regrinding)의 시간과 비용을 단축하고자 하였다.

2. 절삭조건 선정

절삭조건 선정은 가공의 소음 및 진동, 표면 조도, 공구 및 공작기계 주축의 부하, 절삭 칩의 배출상태 그리고 공구수명등의 파라미터를 정하여 실험적으로 최적화하기 위해 노력하였다. 뿐만 아니라, 가공하고자 하는 프로펠러의 형태와 크기에 따라 다양한 공구의 길이가 요구되기 때문에 공구의 길이를 가변적으로 하여 실험을 진행하였다.

이러한 방법으로 설정된 절삭조건은 CAD/CAM S/W에 데이터베이스로 내장되어 자동으로 절삭조건을 선정할 수 있도록 되어 있다. 이 프로펠러의 경우 가공시간은 약 34시간이 소요되었다.

VII. S/W의 기능 및 구조

1. 구현방향 및 환경

Table 1 Environment for CAD/CAM S/W

구분	구현 환경	특징
그래픽	"OpenGL" 그래픽 라이브러리	-3차원 Rendering -C 언어와 호환 -Windows NT에서 기본적으로 제공
OS	Windows NT	-32Bit 운영체제 -Multi tasking 지원
사용언어	MS Visual C++ 2.0	-MFC를 이용한 windows appli. programming 지원 -OpenGL Interface 지원
Platform	펜티엄 PC	-고속 processing 지원 -기본적인 32 Bit 수행환경 지원

PC상에서 다양한 기능을 갖춘 CAM S/W를 구현한다는 것은 개발도구선정 및 구현환경 선정에 많은 제약조건이 따른다는 것을 의미한다. 우선 다음과 같은 구현의 기본 방향을 설정하고 그에 적합한 구현 환경을 선정하였다.

- PC 상에서 구현될 것.
- 3차원 그래픽이 가능할 것.
- 사용자와의 인터페이스(Interface)에 용이할 것.

위의 기본적인 방향을 기준으로 하여 선정된 구현 환경은 Table 1과 같다.

2. S/W의 기능

CAM S/W의 기본 기능은 다음과 같다.

- 모델링 기능
  - 프로펠러 형상의 3차원 모델링 기능
  - 기본적인 모델러 기능인 확대(Zoomming), 회전(Rotation), 이동(Moving) 기능
  - 3차원 셰이딩(Shading) 형상 및 Wireframe 형상 제공
  - 허브와 날개 사이의 블렌딩 형상 제공
- CL 데이터 생성
  - 황삭, 중삭, 정삭의 CL 데이터의 자동생성
  - 각 가공의 최적 가공조건 자동 제시
  - 검증을 위한 생성된 공구경로 디스플레이 및 공구 이동 애니메이션 기능
- NC 데이터 생성(Post Processing) 기능
  - 5축 가공을 위한 NC 데이터 생성
  - 가공 정보 자동 제공

VIII. 결론

본 연구에서는 모형 프로펠러의 CAD/CAM 시스템을 구축하기 위하여 먼저, 기존에 사용하고 있던 텍스트위주의 설계 S/W를 본 CAD/CAM 시스템에 통합하였고 프로펠러의 설계와 형상모델링 그리고 가공을 하나의 S/W에서 가능하게 함으로써 프로펠러 설계의 효율성 및 가시화를 가능하게

하였다.

CAD 모듈에서는 NURBS 모델링 방법을 이용한 곡선모델링, 곡면모델링, 곡면블렌딩등의 프로펠러 형상정의를 위한 기능을 모두 가능하게 하였으며 셰이딩등의 기능을 부여함으로써 가시적 효과도 향상시켰다.

프로펠러의 가공부분인 CAM 모듈에서는 가공을 횡삭, 증삭 및 정삭으로 나누고 공구/공작물의 간섭 및 충돌을 자동으로 체크하고 방지한 상태에서 공구궤적을 자동으로 생성하도록 함으로써 곡면 모델링부터 NC 데이터의 생성까지 초보자도 쉽게 사용할 수 있도록 하여 기존에 고도로 숙련된 작업자만 가능하던 업무를 누구나 쉽게 할 수 있도록 하였다.

절삭조건 선정에 있어서는 가공성을 고려하여 고속가공을 채택하였으며 절삭실험을 통해 주어진 여건하에서 최적의 가공조건이 되도록 하였다. 특히, 사상 시간이 대부분을 차지하고 있는 프로펠러 가공공정에서 사상시간을 감소시키기 위해 모델링부터 가공까지 기계가공에서 대부분의 정밀도를 낼 수 있도록 함으로써 프로펠러 제작의 생산성 향상을 최고 목표로하여 연구를 진행하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] B.K. Choi, J.W.Park and C.S.Jun., "Cutter-location data optimization in 5-axis surface machining", Computer Aided Design, Vol.25, No.6, pp377-386, 1993.
- [2] R.B.Jerard, J.H.Angleton and R.L.Drysdale "Sculptured surface tool path generation with global interference checking", Proc. Design Productivity Int'l Conf, Hawaii, U.S.A, pp737-742, 1991.
- [3] 조현덕, 전용태, 양민양, "5축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구", 대한기계학회논문집, Vol.17, No.8, pp2001-2022, 1993.
- [4] G.W.Vickers., "Computer-aided manufacture of marine propeller", Computer Aided Design, Vol.9, No.4, pp267-274, 1997.
- [5] H.K.Toenshoff and J.H.Camacho., "Die Manufacturing by 5-axis and 3-axis milling", J of Mechanical Working Technology, Vol.20, pp105-119, 1983.
- [6] 전차수, 박세형, 전용태., "자유곡면의 5축 NC가공을 위한 CAM시스템 개발", 한국정밀공학회지, Vol.10, No.1, pp52-61, 1993.
- [7] B. K. Choi., Surface modeling for CAD/CAM, Elsevier, 1991.