

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

프로펠러 블레이드의 형상설계 및 CNC 공구경로 생성

정 종 윤*

Parametric Shape Design and CNC Tool Path Generation of a Propeller Blade

Jong-Yun Jung*

ABSTRACT

This paper presents shape design, surface construction, and cutting path generation for the surface of marine ship propeller blades. A propeller blade should be designed to satisfy performance constraints that include operational speed which impacts rotations per minutes, stresses related to deliverable horse power, and the major length of the marine ship which impacts the blade size and shape characteristics. Primary decision variables that affect efficiency in the design of a marine ship propeller blade are the blade diameter and the expanded area ratio. The blade design resulting from these performance constraints typically consists of sculptured surfaces requiring four or five axis contoured machining. In this approach a standard blade geometry description consisting of blade sections with offset nominal points recorded in an offset table is used. From this table the composite Bezier surface geometry of the blade is created. The control vertices of the Bezier surface patches are determined using a chord length fitting procedure from the offset table data. Cutter contact points and path intervals are calculated to minimize travel distance and production time while maintaining a cusp height within tolerance limits. Long path intervals typically generate short tool paths at the expense of increased however cusp height. Likewise, a minimal tool path results in a shorter production time. Cutting errors including gouging and under-cut, which are common errors in machining sculptured surfaces, are also identified for both convex and concave surfaces. Propeller blade geometry is conducive to gouging. The result is a minimal error free cutting path for machining propeller blades for marine ships.

Key Words : shape design of propeller blades (프로펠러 블레이드의 형상 설계), MAU section (MAU 단면), CNC tool path generation (CNC 공구경로 생성), 5-axis machining (5축가공), compound surface (복합곡면), composite Bezier surface (합성 비지어 곡면)

* 창원대학교 산업공학과

1 서 론

프로펠러 블레이드의 표면은 자유곡면이어서 수학적 표현이 어렵고 그로 인하여 CNC 가공기에 의한 자동화의 실현이 매우 어렵게 된다. 프로펠러의 생산은 수가공으로 연삭작업에 의존하기 때문에 생산시간이 과다하게 소요되고 인건비가 큰 비중을 차지하게 된다. 이러한 수가공에 이루어지는 작업을 자동화하여 생산시간을 단축시키고 생산비의 절감이 절실히 필요하다. 본 연구의 목적은 중소형 선박의 프로펠러 설계기술을 자동화하여 설계시간을 단축하고 미숙원자라도 정확한 계산을 바탕으로 설계할 수 있도록 하고 블레이드 표면을 곡면으로 수식화하여 NC 기계에서 가공할 수 있도록 하여 생산기간을 단축시키는 데 일조를 주고자 한다.

프로펠러는 선박의 추진성능에 크게 영향을 미치므로 직경과 전개면적비 같은 주요항목이 여러 가지 제약조건을 만족시키며 정확한 계산을 바탕으로 설계되어야 한다. 프로펠러의 블레이드는 양면이 매우 부드러운 곡면이므로 물과의 마찰력을 최소화하며 날개가 꼬이고 휘어져 있어 추진력을 극대화하도록 설계 되어있다. 이러한 블레이드를 수작업에 의해 생산한다면 부드러운 곡면을 얻기 힘들기 때문에 NC 기계에서 가공하기 위해서 블레이드를 곡면의 수식으로 표현하여야 한다. 5축 가공기에서의 곡면의 생산은 장점뿐만 아니라 단점도 있다. 생산시간의 단축, 접근 불가능지역 해소, 복잡한 곡면의 가공 등의 장점을 살리기 위해서 gouging 및 under-cut의 발생을 방지하고 cusp height를 계산하여 가공오차가 항상 허용오차의 범위이내에 있도록 하여야 하는 등 공구경로 생성시에 여러 가지 검토하여야 할 사항이 많아지게 된다.

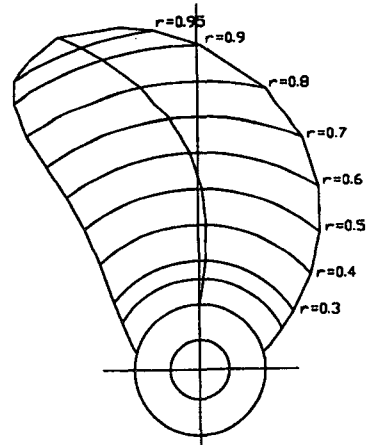
현재 선박 프로펠러 설계의 연구는 종래에 국외에서 연구¹⁻³가 있었고 국내에서는 소수의 문헌⁴이 발표되었으나 설계자동화에 관한 문헌은 거의 없었으며 프로펠러 블레이드 연삭작업의 자동화⁵에 관한 연구가 있었다. 블레이드의 곡면 설계에 관한 논문⁶이 있었으며, 프로펠러의 가공에 관한 연구는 문헌^{7,8}을 찾을 수 있었다. 자유곡면 모델링은 CAD/CAM 분야에서는 특히 자동차의 차체를 생산하는 금형 제작이나 전자제품의 몰드 금형 제작 등에 많이 이용되고 있다. 국외에서는 Ferguson, Bezier surface, B-spline, NURBS 등의 곡면의 연구⁹⁻¹¹가 많이 발표되었고, 국내에서도 곡면 모델링¹², 점군 data의 보간¹³에 관한 발표가 있었다. 국내에서 금형의 가공¹⁴에 관한 연구와 자유곡면의 가공에 관한 연구¹⁵⁻¹⁷가 있었고,

경제적인 CL 데이터의 계산¹⁸, 5축 가공¹⁹⁻²⁰, 복합곡면의 간섭방지²¹ 등 국내외에서 상당수 있었다.

2 선박용 프로펠러

2.1 프로펠러의 형상

프로펠러의 각 반경비 $\frac{r}{R}$ 에 따라 피치각 (pitch angle)이 변동되는데 피치가만큼 날개가 꼬여 있지만 만일 이 모든 피치각을 0도로 하여 날개를 평면 위에 펼쳐 놓았다면 그때에 형성되는 날개의 면적을 전개면적이라 한다. 블레이드의 두께는 날개의 좌우 가장자리에 가까울수록 얇아지고 중앙부에서는 두꺼워진다. 이러한 프로펠러의 형상¹을 평면도로 Fig. 1에 표현하였으며 그림의 각 r 은 반경비 $\frac{r}{R}$ 를 나타낸다.



Propeller Blade

Fig. 1 Shape of a propeller blade

2.2 블레이드 단면의 형태

블레이드의 각 단면은 pitch line을 중심으로 pressure side와 suction side로 구성되어 있다. Pressure side는 물을 가르고 프로펠러가 전방으로 전진하도록 압력을 받는 면이고 suction side는 그 반대 면이다. 전연단은 물을 가르는데 부분이므로 그 두께는 프로펠러의 효율에 영향을 미친다. 전연단의 rounding 반경은 프로펠러의 반경비 $r=0.8$ 에서, 후연단은 $r=0.9$ 에서 최대두께가 되며 이때 익폭의 약 0.4 - 0.5%에⁴ 해당된다. Fig. 2에 MAU section의 형태를 나타내었다. 단면의 형상은 블레이드를 반경비에 따라 원호 모양으로 절단하였기 때문에

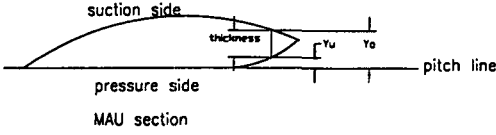


Fig. 2 Blade section

원통면에 나타나지만 Fig. 2에는 평면에 펼쳐진 모양을 나타내었다. 블레이드의 가장 두꺼운 부분은 날개의 익선단 (edge)에 가까울수록 날개폭의 50%되는 위치이지만 익근부에서는 전연단 (leading edge)에서 32%되는 위치이다.

3 프로펠러의 형상설계

3.1 프로펠러 설계의 제반 조건 및 프로펠러의 직경

선박 프로펠러 설계시 선체, 기관, 축계 등 여러 가지의 조건에 부합되고, 예인력, 추력 등 특정 요구조건에 부합 되도록 설계되어야 한다. 본 연구의 초점은 프로펠러의 mechanical design에 의한 프로펠러의 성능향상에 있지 않고, 기 연구되어 프로펠러 제작 시 사용되는 offset table과 설계시에 요구되는 조건을 입력변수로 이용하여 일반 사용자가 프로펠러의 형상을 쉽게 설계하도록 하는데 그 의미가 있다.

프로펠러의 설계 이전에 연속 최대출력시 전달마력과 정격회전수, 상용출력시 전달마력과 정격회전수, 배의 밑에서 프로펠러 축 중심까지의 높이 등이 결정되어야 한다. 25% sea margin을 고려할 때 연속최대 출력시 선박의 속도와 상용출력시의 선박의 속도는 프로펠러 설계시에 반드시 고려되어야 한다.

프로펠러의 직경은 선박의 추진력 및 프로펠러의 전개면적비와 크게 관계되므로 직경을 정확히 계산하여야 한다. 상용출력시 출력계수³ Bp는 다음과 같이 표현된다.

$$B_p = \frac{N \cdot \sqrt{n_r \cdot P}}{V_a^{2.5}} \quad (3.1)$$

여기서 N은 상용출력시 정격회전수 [rpm], \$n_r\$은 프로펠러의 효율비로서 약 1.0, P는 상용출력시 전달마력, \$V_a\$는 프로펠러의 전진속도 [knot]이다. 직경계수³ \$\delta\$는 다음과 같이 표현되므로

$$\delta = \frac{N \cdot D}{V_a} \text{이며, 프로펠러의 직경 } D\text{는}$$

$$D = \frac{\delta \cdot V_a}{N} \text{이다.} \quad (3.2)$$

출력계수 Bp와 직경계수 \$\delta\$는 도표로서 표시되었으나 이를 간략히 근사화 하면 다음과 같다.

$$3 \text{ 날개에서 } \delta = 10.00\sqrt{B_p} - 6.667a_e + 14.31 \quad (3.3)$$

$$4 \text{ 날개에서 } \delta = 9.635\sqrt{B_p} - 6.667a_e + 14.55 \quad (3.4)$$

$$5 \text{ 날개에서 } \delta = 9.251\sqrt{B_p} - 5.0a_e + 12.5 \quad (3.5)$$

여기서 \$a_e\$는 날개의 전개면적비로서 \$a_e = \frac{A_e}{A}\$이며 \$A_e\$는 프로펠러의 전개면적이다. 전개면적이란 프로펠러 블레이드의 피치각을 0도로 펼쳤을 때의 면적이며 A는 전단면적 (disk area)으로서 \$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4}\$이다.

3.2 피치비 \$\frac{H}{D}\$ 및 축경 d와 boss경 \$d_o\$

피치비는 \$\frac{H}{D}\$로 나타내어지며 여기서 H는 프로펠러 블레이드의 피치이다. 피치는 각 반경비의 위치에 따라 달라지나 피치비는 개량형 AU (MAU) 단면의 경우 각 반경의 비 (\$\frac{r}{R}\$)에 따라 변함없이 일정하다. 여기서 R은 프로펠러의 반경을 의미하고 r은 프로펠러 내의 임의의 반경을 나타낸다. 피치비는 날개의 수, 전개면적비, 출력계수에 따라 도표⁴로서 표현되어 있으나 이를 근사화 시키면 다음과 같다.

$$3\text{의, } \frac{H}{D} = \frac{1}{(-3.367a_e + 2.326)\sqrt{B_p} + 8.956a_e - 4.617 - 0.193a_e + 0.538} \quad (3.6)$$

$$4\text{의, } \frac{H}{D} = \frac{1}{(0.835\sqrt{B_p} - 0.908)} + 0.067a_e + 0.410 \quad (3.7)$$

$$5\text{의, } \frac{H}{D} = \frac{1}{(0.293a_e + 0.298)\sqrt{B_p} - 0.856a_e + 0.546 + 0.335a_e - 0.193} \quad (3.8)$$

프로펠러의 축경 d는 축이 끼워지는 구멍의 직경으로서 프로펠러 회전에 의한 물의 반작용을 견딜 만큼 충분히

크게 설계되어야 한다. 일반적으로 축경은 프로펠러의 반경이 커지면 따라서 증가하나 전달마력과 분당 회전수로 표시하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\left(\frac{P}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \leq 1.0 \text{ 인 경우, } d[\text{mm}] = 50 + 90\left(\frac{P}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.9)$$

$$1.0 < \left(\frac{P}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \leq 2.5 \text{ 인 경우, } d[\text{mm}] = 40 + 100\left(\frac{P}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.10)$$

$$\left(\frac{P}{N}\right)^{\frac{1}{3}} > 2.5 \text{ 인 경우, } d[\text{mm}] = 15 + 110\left(\frac{P}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.11)$$

위 식은 프로펠러가 일체식과 조립식에 공히 사용된다. Boss 경도 프로펠러의 직경에 따라 커지나 일반적으로 축경에 따라 비례한다. Boss 경과 축경과의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다. Boss 경은 프로펠러 블레이드가 조립되는 상황에 따라 일체식과 조립식으로 구분되며 약간씩 차이가 나게된다. 블레이드가 일체식인 경우에는 다음 식이 사용되며

$$D \leq 2.0 [\text{m}] \text{ 인 경우, } do [\text{mm}] = 1.8d \quad (3.12)$$

$$2.0[\text{m}] < D \leq 4.0[\text{m}] \text{ 인 경우, } do [\text{mm}] = 2.0d \quad (3.13)$$

$$D > 4.0 [\text{m}] \text{ 인 경우, } do [\text{mm}] = 2.1d \quad (3.14)$$

블레이드가 조립식 인 경우에는 다음 식이 사용된다.

$$D \leq 2.0 [\text{m}] \text{ 인 경우, } do [\text{mm}] = 2.6d \quad (3.15)$$

$$2.0 [\text{m}] < D \leq 4.0 [\text{m}] \text{ 인 경우, } do [\text{mm}] = 2.7d \quad (3.16)$$

$$D > 4.0 [\text{m}] \text{ 인 경우, } do [\text{mm}] = 2.8d \quad (3.17)$$

3.3 익근부의 익폭 l 과 익근의 두께 t

프로펠러의 날개에 추력, 토크 및 원심력 등의 정상적인 힘 이외에 진동, 부유물과의 충돌 등 우발적인 힘이 작용되므로 익의 두께는 충분히 두꺼워야 하나 지나치게 두꺼우면 프로펠러가 너무 무거워 지고 회전을 시키기 위해 지나치게 많은 힘을 소모하게되며 프로펠러 생산시 재료비가 높게되므로 적당한 두께를 산출해야 한다. 프로펠러에 사용되는 소재에 따라 압축응력이 달라지므로 재질의 선정도 중요한 요소가 된다. 일반적으로 중소형 선박의 프로펠러에는 망간 황동이 많이 쓰이며 최대허용 압축응력은 약 450 [Kg/cm²]이다. 익근부의 폭과 두께의 비는 일반적으로 날개의 수나 형태에 따라 변동되지 않고 일정한 값을 사용한다. 중소형 선박에서 익단면의 정면에 작

용하는 bending moment⁴ Mc는 다음과 같이 표현된다.

$$Mc = k_1 \cdot \left(k_2 \frac{\eta_0}{1-s} + a_r\right) \cdot \frac{P}{Z \cdot N} \quad (3.18)$$

여기서 P는 연속최대출력시 기관의 전달마력 이며 N은 연속최대출력시 프로펠러의 매분 회전수를 나타낸다. a_r은 익근부에서 익단면의 피치비이며, s는 slip비로서 $s = 1 - \frac{30.866V_A}{N \cdot H}$ 이고 H는 피치이다. η₀는 프로펠러의 단독효율로서 도표로부터 근사식을 유도하여 사용하며, k₁, k₂는 피치비 및 보스비에 따라 변화하는 계수로서 아래와 같이 표현된다.

$$k_1 = \frac{450,000(1-x_1)}{2\pi \cdot (1+x_1) \cdot \sqrt{a_r^2 + \pi^2 \cdot x_1^2}} \quad (3.19)$$

$$k_2 = \frac{\pi^2 \cdot x_1 \cdot (2+x_1)}{3a} \quad (3.20)$$

여기서 x₁은 boss ratio로서 $\frac{d}{D}$ 이며, a는 반경비가 0.7인 위치에서의 피치비이다. 따라서 익근부에 작용하는 bending moment가 프로펠러 소재의 허용최대압축응력 Sc의 범위이내에 오도록 하면 익근부의 폭⁴ l은 다음과 같이 나타내어진다.

$$l = \left(\frac{Mc \cdot Zc}{m^2 \cdot Sc}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.21)$$

여기서 Zc는 익단면의 형상에 따른 단면계수⁴로서 각 반경의 비에 따라 변하게 되며 반경비가 0.2인 위치에서 MAU형 프로펠러는 13.08이며 원호형 프로펠러는 13.16의 값을 갖는다. 익폭이 구하여지면 익의 두께 t는 $t = m \cdot l$ 이 되며 m은 두께의 비로 일반적으로 0.22가 사용된다. 위에서 사용된 η₀의 근사식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$3\text{익에서 } \eta_0 = \frac{1}{0.088\sqrt{B_p} + 0.858} - 0.142a_c - 0.057 \quad (3.22)$$

$$4\text{익에서 } \eta_0 = \frac{1}{0.116\sqrt{B_p} + 0.965} - 0.115a_c + 0.021 \quad (3.23)$$

$$5\text{익에서 } \eta_0 = \frac{1}{0.109\sqrt{B_p} + 0.946} - 0.086a_c - 0.02 \quad (3.24)$$

3.4 전개면적비

이상에서 구한 프로펠러의 직경은 예상 전개면적비에 의하여 구하였으므로 프로펠러 회전시 cavitation이 발

생하는지를 반드시 검토하여야 한다. Burrill의 cavitation 판정방법은 한계투영면적비를 계산하여 예상 전개면적비보다 작거나 많은 차이가 발생하면 cavitation이 발생한다고 판정하고 프로펠러의 직경을 재 계산한다. 만일 한계면적비가 크거나 차이가 작으면 예상전개면적비와 직경을 구하고자 하는 프로펠러의 전개면적비와 직경으로 채택한다. Burrill의 cavitation 계수¹ σ_B 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_B = \frac{P_0}{\frac{1}{2}\rho \cdot V^2} \quad (3.25)$$

여기서 P_0 는 프로펠러 축의 중심으로 작동하는 압력으로 다음과 같이 나타낼 수 있다. $P_0 = 10,340 + 1,025 \cdot I$ 이며 I 는 수면에서 프로펠러 축 중심까지의 거리 [m]이고, V 는 프로펠러 반경비 0.7인 위치에서 익단면과 물과의 상대속도 [m/sec]로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \sqrt{v_A^2 + u^2} \quad (3.26)$$

v_A 는 프로펠러의 전진속도 [m/sec]로 $v_A = 0.5144 \cdot V_A$ [knot]이며 u 는 프로펠러 반경비 0.7인 위치에서 익단면의 회전속도 [m/sec]로서 다음과 같이 구한다.

$$u = 0.7\pi \cdot D \cdot \frac{N}{60} \quad (3.27)$$

여기서 ρ 는 해수밀도로서 104.51 [Kg · sec²/m⁴]이다. 또한 프로펠러가 발생해야할 추력¹ T 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = 75 \frac{P}{v_A} \cdot \eta_o \cdot \eta_R \quad (3.28)$$

η_R 은 프로펠러 효율비로서 약 1.0의 값을 갖는다. 프로펠러의 투영면적 A_p 와 추력과의 관계식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_p = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho \cdot V^2 \cdot \tau} \quad (3.29)$$

여기서 τ 는 단위추력계수로서 도표로부터 다음과 같이 근사식으로 구할 수 있다.

$$\sigma_B \leq 0.48 \text{인 경우, } \tau = 0.266\sigma_B + 0.047 \quad (3.30)$$

$$\sigma_B > 0.48 \text{인 경우, } \tau = 0.25\sigma_B + 0.055 \quad (3.31)$$

도표⁴로 부터 전개면적비 a_e 와 피치비 $\frac{H}{D}$ 의 관계식을 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a_e = (0.25 \frac{H}{D} + 0.94)a_p + 0.016 \frac{H}{D} - 0.017 \quad (3.32)$$

여기서 a_p 는 투영면적비로서 투영면적과 전단면적의 비로 구한다. 여기서 구한 a_e 가 처음에 시작한 예상전개면적비 보다 작거나 큰 차이가 있으면 a_e 값으로 예상전개면적비를 대신하여 프로펠러 직경과 전개면적비를 다시 구한다. 반복적으로 구한 a_e 가 예상전개면적비 보다 크거나 별 차이가 없으면 D 와 a_e 를 프로펠러의 직경과 전개면적비로 채택한다.

3.5 Offset Table 및 블레이드의 좌표계산

프로펠러 블레이드를 일정한 반경비로 축을 중심으로 원호 모양으로 절단하고 정면도 (Y)방향에서 바라본 단면을 평면으로 펼쳤을 때의 모양을 Fig. 2에 표현하였다. 그림의 치수는 각 반경비의 날개폭을 1로 기준 했을 때 그에 대한 100분율로 나타낸다. 프로펠러를 선체와 기관의 요구조건에 따라 설계하고 이러한 치수를 여러 반경비에 따라 날개의 여러 위치에서 프로펠러의 형상 치수를 표로서 나타내면 Table 1과 같이 되며 이러한 표를 offset table 이라 한다. Table 1은 MAU 단면의 offset table을 보여준다.

블레이드 피치 면의 표면을 기준선 (generator line)을 중심으로 좌끝점, 우끝점으로 하고 동심원호의 길이를 좌끝점과 우끝점 길이의 합으로 표현한다. 중요 위치에서 반경비의 단면 치수가 offset table에 나와 있으므로 각 단면형상을 3차원 좌표계로 변환이 가능하다. Offset table에 각 익폭의 17개의 위치에 data를 표시하였다. 이 table 상에는 두께가 Y_u 와 Y_o 로 나타나므로 한 면의 data를 구하면 반대 면의 data도 구할 수 있게 된다.

MAU 단면 pressure side의 좌표계산을 Fig. 3에 표시하였다. a는 pitch line 선상의 길이로 offset table에 X로 나타나 있고 b는 offset table의 $Y_u \cdot \tan(\theta)$ 이며, 여기서 θ 는 피치각이다. c를 우끝점의 좌표-a-b로 표시하면, d는 $c \cdot \cos(\theta)$ 이고, e는 $r_1 \cdot \sin(\frac{d}{r_1})$ 이며, 여기서 r_1

Table 1 Offset table of MAU type blade section

r/R	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.95
X	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	35.00	35.00	35.00	34.00	30.00	21.00	8.3	6.00
YU								
X	2.00	2.00	2.03	2.18	2.51	2.84	3.06	3.13
Y	51.85	51.85	51.86	49.95	42.90	32.35	21.10	19.65
YU	24.25	24.25	24.25	23.60	20.50	14.00	4.00	
X	4.00	4.00	4.06	4.38	5.03	5.68	6.11	6.25
Y	59.75	59.75	59.75	58.00	52.20	41.70	31.50	30.00
YU	19.05	19.05	19.05	18.10	15.95	10.45	2.70	
X	6.00	6.00	6.09	6.54	7.54	8.51	9.17	9.38
Y	66.15	66.15	66.15	64.75	59.90	50.10	40.90	39.60
YU	15.00	15.00	15.00	14.25	11.95	8.05	2.05	
X	10.00	10.00	10.18	10.91	12.56	14.19	15.28	15.63
Y	76.05	76.05	76.05	75.20	72.56	64.60	57.45	56.75
YU	10.00	10.00	10.00	9.45	7.70	5.05	1.20	
X	15.00	15.00	15.23	16.36	18.84	21.28	22.02	23.44
Y	85.25	85.25	85.25	84.85	82.35	78.45	74.70	74.30
YU	5.40	5.40	5.40	5.00	4.10	2.70	0.70	
X	20.00	20.00	20.31	21.81	25.12	28.38	30.56	31.25
Y	92.50	92.50	92.50	91.80	90.60	88.90	87.45	87.30
YU	2.55	2.55	2.55	2.25	1.75	1.15	0.55	
X	30.00	30.00	30.47	32.72	37.68	42.56	45.65	46.87
Y	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.70	99.65
YU								
X	32.00	32.00	32.50	34.90	40.20	45.40	48.80	50.00
Y	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
YU								
X	49.00	49.00	49.44	52.56	57.23	61.82	64.81	66.66
Y	97.75	97.75	97.75	97.75	97.75	97.75	97.75	97.75
YU								
X	50.00	50.00	50.37	52.13	56.03	59.85	62.42	63.23
Y	89.95	89.95	89.95	89.95	89.95	89.95	89.95	89.95
YU								
X	60.00	60.00	60.29	61.70	64.82	67.68	69.94	70.59
Y	78.15	78.15	78.15	78.15	78.15	78.15	83.05	84.65
YU								
X	70.00	70.00	70.22	71.28	73.62	75.91	77.46	77.94
Y	63.15	63.15	63.15	63.15	63.15	63.15	66.35	68.65
YU								
X	80.00	80.00	80.15	80.85	82.41	83.94	84.85	85.30
Y	55.25	55.25	55.25	55.25	55.25	55.25	55.25	55.25
YU								
X	90.00	90.00	90.07	90.43	91.21	91.97	92.48	92.65
Y	25.30	25.30	25.30	25.30	25.30	25.30	25.30	25.30
YU								
X	95.00	95.00	95.04	95.21	95.60	95.92	96.24	96.32
Y	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	19.40	21.50
YU								
X	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Y	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	6.85	8.00
YU								

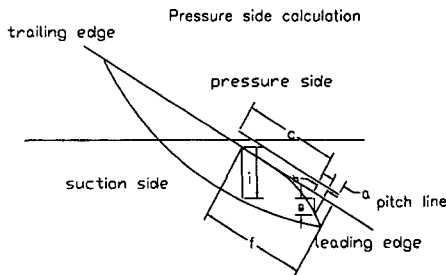


Fig. 3 Section of MAU type blade for coordinate calculation

는 각 반경비에서의 반경이고 $\frac{d}{r_i}$ 는 generator line과의 사이각이다. 그러므로 X좌표는 위의 e이고, Y좌표는 $\sqrt{r_i^2 - e^2}$ 이다. f는 단면의 maximum thickness이며, g는 $Y_u \cdot \cos(\theta)$ 이다. h를 f-a로 표시하면, i는 $h \cdot \sin(\theta)$ 이고, j를 $r_i \cdot \tan(\text{rake angle})$ 과 boss의 pressure side의 높이의 합으로 나타내고, k를 j-g-i로 표시하면, Z좌표는 k가 된다.

4 곡면의 합성

프로펠러의 블레이드 표면과 같이 복잡한 형상을 수식

화 하는 방법으로 Bezier surface, Ferguson surface, NURBS등을 이용하게 된다. 단위 곡면에서는 u, v방향의 파라미터의 변화율에 의해서 형상이 결정되며 곡면의 차수는 control vertices의 개수에 의해 좌우된다. 블레이드의 표면과 같이 변곡이 많지 않으면 일반적으로 3차식을 많이 사용한다. 양방향의 파라미터가 모두 3차일때 cubic Bezier patch⁹의 식은 다음과 같다.

$$r(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_i^3(u) B_j^3(v) V_{ij} \quad (4.1)$$

여기서 u와 v는 각 방향의 매개변수이며, $0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$,

$$B_i^3(u) = \frac{3!}{(3-i)!i!} u^i (1-u)^{(3-i)} \text{ 이고 } u \text{와 } v \text{를 조화 시켜주는 blending function이다. } V_{i,j} \text{는 곡면의 control vertices의 좌표이고 } B_i^3 \text{와 } B_j^3 \text{은 각각 } u \text{와 } v \text{의 3차식이다.}$$

곡면상에서 측정된 여러 개의 점의 정보를 가지고 곡면을 표현할 때 측정점들이 서로 일정한 간격을 갖는 규칙적인 배열이 아닌 경우 composite Bezier patch를 사용하여 인접한 곡면들을 연결시켜 합성곡면을 형성할 수 있다. 하나의 surface patch를 표현하기 위해 식 4.1과 같이 16개의 control vertices를 알아야 하며 이점들이 적절히 선정되어야 인접한 곡면을 서로 부드럽게 연결할 수 있고 블레이드의 표면을 수식적으로 나타내기에 적합하게 된다.

4.1 Chord - Length Spline Fitting 과 Boundary Control Vertices

한 점을 중심으로 양방 향으로 인접한 2개의 구간에서 양방향의 접선벡터가 같다면 양 구간은 그점을 중심으로 부드럽게 연결된다. P0, P1, P2, 3개의 점을 통과하는 곡선을 Ferguson curve¹⁰로 가정하고 양 끝점의 end tangent vector를 안다면 점 P1의 접선벡터를 구하여 2개의 곡선을 부드럽게 연결시킬 수 있다. 여기서 G¹-continuous condition¹⁰을 만족하기 위해 첫 번째 곡선 segment r^a(u)의 끝 부분의 접선벡터와 두 번째 곡선 segment r^b(u)의 시작 접선벡터가 같다면 식4.2, 4.3과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{r}^a(u=1) = t_1 \quad (4.2)$$

$$\dot{r}^b(u=0) = \omega t_1 \quad (4.3)$$

여기서, $\omega = \frac{\beta}{\alpha}$ 로서 접선벡터의 magnitude 비율을

나타낸 것이다. Chord - length spline fitting¹²에서는 양끝의 접선벡터의 크기를 $\alpha = |P_1 - P_0|$, $\beta = |P_2 - P_1|$ 로 나타낸다. Chord- length비를 이용하여 G^2 - condition을 나타내면 식 4.4와 같다.

$$\ddot{r}^b(0) = \ddot{r}^a(1) \cdot \omega^2 \quad (4.4)$$

$n+1$ 개의 data point로 G^2 -Condition을 이용한 curve fitting으로 확장하여 end tangent vector와 chord length의 관계식을 구하면¹² $\{\omega_{j-1}\omega_j^2 t_{j-1} + 2\omega_j(1+\omega_j)t_j + t_{j+1}\} = 3\{P_{j+1} + (\omega_j^2 - 1)P_j - \omega_j^2 P_{j-1}\}$ 이 된다. 끝점에서 $\omega_0 = 1$ 이라 가정하고 여기서 구한 각 점에서의 접선벡터 t_j 와 ω_j 를 이용하여 Bezier curve의 control vertices를 구하면 $V_0 = P_{i,j-1}$, $V_1 = P_{i,j-1} + \omega_{j-1} \frac{t_{i,j-1}}{3}$, $V_2 = P_{i,j} - \frac{t_{i,j}}{3}$, $V_3 = P_{i,j}$ 이다.

여기서 구한 cubic Bezier curve의 control vertices는 Bezier patch로 곡면의 합성을 위해 patch의 boundary curve로 이용되나 인접한 patch와 부드럽게 연결되기 위해 4변에서 이웃한 patch와의 off-boundary control vertices와 상호 G^1 continuous condition을 유지하여야 한다. 여기서 'complete-local G^1 condition'을 유지하기¹³ 위해서는 3차식으로는 불충분하므로 6차의 Bezier curve로 degree elevation을 하여 필요한 control vertices를 구한 다음 3차로 degree reduction을 한다. de Casteljau algorithm⁹을 이용하여 degree n 의 curve를 degree elevation 하며 control vertices를 구하는 식은 다음과 같다.

$$V_i^+ = \frac{i}{n+1} V_{i-1} + (1 - \frac{i}{n+1}) V_i \quad (4.5)$$

여기서 V_i^+ 는 degree elevation에 의해 얻어지는 새로운 control vertices이고 $i=0, 1, \dots, n+1$ 이다. Degree elevation을 통해 얻은 곡선은 식의 차수가 높을 뿐 곡선의 모양에는 변함이 없다. 위의 식을 row방향과 column 방향으로 각각 $n=3, 4, 5$ 의 순서로 적용하여 3차의 Bezier curve에서 6차의 Bezier curve의 control vertices를 구한다.

4.2 Off-Boundary Control Vertices

하나의 patch에서 6차의 boundary control vertices는 Bezier curve의 4변을 형성하고 있다. Off bound-

ary control vertices란 4변의 control vertices에서 바로 내부에 인접한 control vertices를 의미한다. 2개의 인접한 양 방향 6차의 Bezier surface가 서로 부드럽게 연결되기 위해서는 common boundary control vertices와 off-boundary control vertices를 연결하는 벡터가 동일 평면상에 존재하여야 한다. 그러하기 위해서는 3개의 접선벡터 a, b, c 가 다음의 식을 만족시키도록 선정되어야 한다.

$$p \cdot a + q \cdot b + r \cdot c = 0 \quad (4.6)$$

여기서 p, q, r 는 동시에 0이 아닌 scalar function이며, 벡터 a, b 는 common boundary의 한 control vertices에서 서로 인접한 patch의 양 방향으로 접선벡터이고, 벡터 c 는 그 점에서 또 다른 매개변수 방향의 접선벡터이다. 이 조건을 Bezier surface에 도입하여 접선벡터로 표현하면 다음의 식¹³을 얻는다.

$$\sum_{i=0}^k d_{ij} (p_i \cdot a_{j-i} + q_i \cdot b_{j-i}) + \sum_{i=0}^{k+1} e_{ij} (r_i \cdot c_{j-i}) = 0 \quad (4.7)$$

여기서 $j=0, 1, \dots, n+k$ 이며,

$$d_{ij} = \binom{j}{i} \binom{n+k-j}{k-i}, \text{ if } \max(0, j-n) \leq i \leq \min(j, k)$$

$$= 0, \text{ otherwise}$$

$$e_{ij} = \frac{k+1}{n} \binom{j}{i} \binom{n+k-j}{k+1-i}, \text{ if } \max(0, j-n+1) \leq i \leq \min(j, k+1)$$

$$= 0, \text{ otherwise}$$

위식을 이용하여 벡터 a, b 를 구하면 다음의 식과 같다.

$$a_2 = \frac{1}{5} \{ (3 + \frac{a_6}{a_0}) a_0 + (\frac{a_0}{a_6}) a_6 \}, \quad a_3 = \frac{1}{2} \{ (\frac{a_6}{a_0}) a_0 + (\frac{a_0}{a_6}) a_6 \},$$

$$a_4 = \frac{1}{5} \{ (\frac{a_6}{a_0}) a_0 + (3 + \frac{a_0}{a_6}) a_6 \}$$

$$b_2 = \frac{1}{5} \{ (3 + \frac{b_6}{b_0}) b_0 + (\frac{b_0}{b_6}) b_6 \}, \quad b_3 = \frac{1}{2} \{ (\frac{b_6}{b_0}) b_0 + (\frac{b_0}{b_6}) b_6 \},$$

$$b_4 = \frac{1}{5} \{ (\frac{b_6}{b_0}) b_0 + (3 + \frac{b_0}{b_6}) b_6 \} \quad (4.8)$$

c_i 벡터는 common joint의 boundary control vertices이므로 이미 구하였다.

4.3 Internal Control Vertices 및 Degree Reduction

Internal control vertices는 off-boundary control

vertices와 boundary control vertices를 이용하여 구하게 된다. r_1 과 r_5 는 off-boundary control vertices, r_0 , r_6 은 boundary control vertices라 하면 de Casteljau algorithm을 이용하여 e_1 의 값을 계산한다. 즉 $e_0 = r_0$, $e_1 = 2r_1 - r_0$, $e_2 = 2r_5 - r_0$, $e_3 = r_6$ 이다. 위의 식을 이용하여 각각의 patch에서 row와 column 방향으로 e_1 과 e_2 를 구하여 e_0, e_1, e_2, e_3 에 대하여 degree elevation을 $n = 3, 4, 5$ 의 순서로 적용하여 $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ 을 구한다. 한 patch에서 각 row와 column의 동일 위치 control vertices에 대하여 서로 다른 2개의 값이 얻어지면 평균치를¹² 구하여 internal control vertices로 정한다.

6차의 Bezier surface는 측정 data를 잘 반영할 수 있으나 곡면에 inflection이 발생하면 지나치게 많이 꼬이게 되어 오히려 곡면이 울퉁불퉁하게 될 우려가 있고 차수가 높을수록 계산과정을 더 많이 거치게 되어 시간이 많이 소요된다. 그러므로 6차로 구해진 모든 control vertices들을 NC가공의 data에 적합하도록 다음의 식을 이용하여 degree reduction⁹을 수행하여 양 방향 3차의 Bezier surface로 변환시킨다.

$$V_i^- = \frac{n}{n-i} V_i - \frac{i}{n-i} V_{i-1}^- \quad (4.9, a)$$

여기서 $i = 0, 1, \dots, n-1$ 이고

$$V_{i-1}^- = \frac{n}{i} V_i - \frac{n-i}{i} V_i^- \quad (4.9, b)$$

$i = n, n-1, \dots, 2, 1$ 이다.

Degree reducible한 경우 식 4.9, a와 4.9, b로 부터 같은 결과 값을 얻으나 degree reducible하지 않으면 $i=0$ 부터 $n/2$ 까지는 식 4.9,a를 사용하고, $n/2 + 1$ 부터 n 까지는 식 4.9,b를 사용하여 근사값으로¹² 구한다. 이런 방법을 사용하여 row와 column에 대하여 순차적으로 6차에서 5차로, 5차에서 4차로, 4차에서 3차로 degree reduction하여 Bezier surface의 control vertices를 구하고 이때 얻어진 control vertices를 이용한 Bezier surface는 인접한 patch를 서로 부드럽게 연결하는 합성 곡면이 된다.

5 자유곡면의 공구경로 생성

자유곡면의 가공은 3축, 4축, 5축 및 그이상의 축을 가진 가공기에서 이루어진다. 동시제어 될 수 있는 3축가공

기는 가격이 저렴하여 많이 보급되어 있으나 공구축이 항상 수직방향으로 놓여 있기 때문에 자유곡면의 가공에는 여러 가지 제약이 많이 따르게 된다. 5축 가공기는 X,Y,Z 3개의 축과 작업물의 회전축과 공구경사축, 또는 A,B 2개의 공구경사축을 가지고 있기 때문에 자유곡면의 가공에 많이 사용되고 있다. 프로펠러와 같은 자유곡면을 5축가공기에서 가공한다면 생산시간을 많이 단축할 수 있다.

5.1 5축가공의 공구축 자세

공구축의 단위벡터는 가공기의 축 이동범위 내에서 자유롭게 위치할 수 있으며 공구의 cutting edge는 곡면상의 현재 절삭이 진행되는 점 cc (cutter contact)에 위치하여야 한다. 그러나 경로생성시 공구의 위치좌표는 cc점이 아니고 공구 밀면 공구원의 중심 c_L (cutter location) 점이므로 2개의 점을 연결시켜주는 벡터 a 를 알고 있어야만 곡면상의 점 cc에서 공구 위치점 c_L 을 구할 수 있게 된다. 여기서 a 는 c_L 점에서 cc 점을 연결하는 벡터이다. 곡면상의 점 cc에서 단위법선벡터 n 과 a 벡터, 단위공구축벡터 s 는 동일 평면상에 존재하여야만 cc점 주변의 위치에서 과절삭을 방지할 수 있다. 공구 밀면과 곡면의 표면과의 접촉성을 높이기 위해 공구축을 가공방향으로 약간 경사지게 하는데 공구 밀면과 가공평면과의 사이각을 tilt angle α 라 한다. 이 α 각은 가공기의 공구축 경사각 범위 이내에서 사용자가 임의로 입력할 수 있으나 일반적으로 15도¹⁴ 이내가 되도록 한다. Fig. 4는 곡면상에서 cc, c_L 점과 a, s 벡터간의 관계를 보여준다. 원점과 cc점간을 연결하는 벡터를 r_c 라 하고 원점과 c_L 점간을 연결하는 벡터를 r_L 이라 하면 다음과 같은 벡터의 내적이 성립한다.

$$n \cdot s = \cos \alpha \quad (5.1)$$

$$n \cdot a = -R \cos(90 - \alpha) \quad (5.2)$$

$$n \cdot s = 0 \quad (5.3)$$

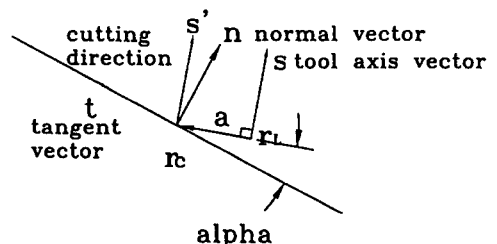


Fig. 4 Tool axis vector and cutting direction

여기서 R 은 a 벡터의 magnitude로서 공구원의 반경이다. 공구의 진행방향을 곡면의 parameter 방향으로 정하면 공구의 이동은 cc점에서 곡면의 접선방향으로 진행되어야 한다. 곡면상의 한 cc점에서 parameter u 방향의 단위접선벡터를 t 라 하면 a 벡터는 t 벡터와 동일 평면상에 존재하며 다음의 벡터 내적이 성립하고, parametric 가공경로에서 절삭방향은 t 방향이 된다.

$$t \cdot a = R \cos \alpha \quad (5.4)$$

$$t \cdot n = 0 \quad (5.5)$$

5.2 공구경로의 직선보간

Parametric 가공경로에서 곡면상의 등경곡선을 공구경로로 정의하면 공구와 곡면의 현재 접촉점 cc1과 다음의 접촉점 cc2간의 길이를 직선으로 보간하여 구한다. 현재의 cc1점에서 cc2점까지의 파라미터의 변화량¹⁵ Δu 는

$$\Delta u = \frac{\rho \cdot \beta}{|r_u|} \quad (5.6)$$

이며 β 는 접촉점 cc1과 cc2에서 두 법선벡터의 사이 각이고, $|r_u|$ 는 u 방향의 접선벡터의 magnitude이며, ρ 는 곡면의 법선곡률반경²²이므로 $\rho = \frac{1}{\kappa_n}$ 이고 법선곡률 κ_n 은 다음과 같이 표현된다.

$$\kappa_n = \frac{a'^T D a'^T}{a'^T G a'^T} \quad (5.7)$$

여기서 a' 는 파라미터 정의역상의 2차원 곡선을 1차 미분한 것이며, D 는 second fundamental matrix이고, G 는 first fundamental matrix이다. cc2점의 파라미터 u_2 는 cc1점의 파라미터 u_1 과 변화량 Δu 의 합으로 $u_2 = u_1 + \Delta u$ 이다. 사이각 β 는 ball end-mill을 사용할 때

$$\beta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\rho + R - \varepsilon}{\rho + R} \right) \quad (5.8)$$

이나 본 연구에서는 flat end-mill²³을 사용하므로

$$\beta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{\rho - \varepsilon}{\rho} \right) \quad (5.9)$$

가 사이각이 된다. 여기서 ε 은 가공의 허용오차이다. 사이각 β 와 허용오차 ε 을 Fig. 5에 표현하였다.

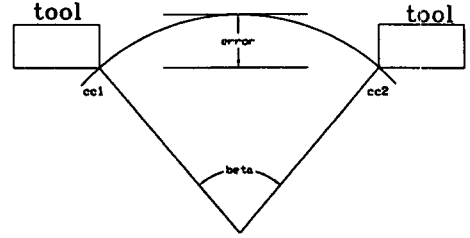


Fig. 5 Angle between 2 normal vectors at cc points and tolerance limit

5.3 공구경로간의 거리

Parametric 방식으로 공구경로를 생성할 때 가공방향으로 한 pass를 절삭하면 다음 pass로 가기 위해 절삭방향이 아닌 다른 방향으로 파라미터를 증가시켜야 한다. 이때의 거리를 경로간 간격 (path interval)이라 한다. 이때 가공방향의 처음 경로를 1차 pass라 하고 다음의 경로를 2차 pass라 칭한다. 1차 pass가 완성되면 2차 pass는 곡면의 한쪽 끝에서 앞절에서 언급한 파라미터의 증분으로 계산할 수 있으나 경로상의 모든 위치에서 가공의 허용오차를 벗어나지 않도록 해야한다. 곡면이 매우 평평하여 u, v 파라미터의 곡률반경이 크고 상대적으로 경로간의 파라미터의 증분이 작으면 1차 pass와 2차 pass에서 경로가 평행하고 2개 공구축의 tilt angle이 서로 같으면 공구원이 교차하는 곳에서 최대의 오차가 발생하므로 그때의 오차가 허용오차 ε 보다 작아야 한다. 즉

$\left(R - \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}} \right) \cos \alpha \leq \varepsilon$ 이다. 이로부터 다음과 같이 경로간격의 근사식을 유도 할 수 있다.

$$l = \frac{2\sqrt{\varepsilon(2R \cos \alpha - \varepsilon)}}{\cos \alpha} \quad (5.10)$$

이며 여기서 R 은 공구반경이고 α 는 tilt angle, ε 은 가공의 허용오차이다. 위의 가정이 성립되지 않으면 앞절에서 서술한 v 방향의 파라미터의 증분 Δv 를 이용한다. 1차 pass의 각 cc점에서 2차 pass에 대한 cusp 높이와 2차 pass의 각 cc점에서 1차 pass에 대한 cusp 높이를 구하여 모두 허용오차에 근접하도록 파라미터의 증분 Δv 를 조정하여야 한다. Fig. 6에 1차 pass와 2차 pass간의 각 공구 접촉점에서 cusp 높이가 형성되는 위치를 표시하였다. 공구의 왕복 이동회수를 단축시키기 위해 공구 접촉점 전체에서 허용오차 ε 을 초과하지 않는 범위 내에서 그에 근접한 경로간격을 갖는 Δv 를 recursive

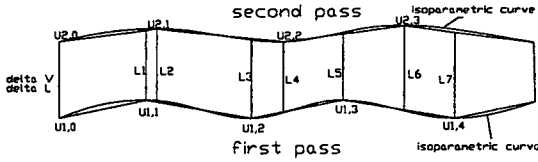


Fig. 6 First pass and second pass

방법으로 찾고 이런 방법을 전체의 pass에 적용하여 각 pass 간의 Δv 를 구한다.

5.4 오목곡면의 과절삭 방지

Flat end-mill을 사용하여 오목 곡면을 가공할 때 u 방향으로 공구가 진행하면 u방향은 물론 v 방향으로도 오목곡면이 과절삭 되는지를 확인하여야 한다. 이때 모든 cc점에서 절삭공구가 가공면에 미치는 곡률반경이 곡면의 최소법선곡률반경보다 항상 작도록 공구반경 R과 tilt angle을 선정하여야 하며 그렇지 않으면 과절삭이 발생될 수 있다. 또한 공구 volume과 곡면의 간섭이 발생하는지를 확인하여야 한다. 그렇지 않을 경우 cc점이 아닌 다른 곳에서 과절삭이 발생될 수 있다. 이때 공구 표면 상의 여러 점과 공구를 수평면에 투영하였을 때 그에 대응하는 곡면의 여러 점을 취하여 간섭을 확인한다. 만일 간섭이 발생되면 tilt angle을 조정하여 간섭을 회피하여 과절삭이 발생되지 않도록 한다. 곡면의 최소법선곡률반경이 공구반경보다 크더라도 공구축 벡터와 곡면의 법선 벡터가 일치하면 tilt angle이 0도가 되어 공구가 가공면에 미치는 곡률반경이 무한대가 되어 오목곡면을 가공할 수 없게된다. 이때는 tilt angle을 증가시켜 가공면에 미치는 공구원의 곡률반경이 작아지도록 하여야 한다. Tilt angle이 α 이면 공구원이 평면에 미치는 곡률반경

$$\rho' = \frac{R}{\sin \alpha}$$

가 되며, ρ' 이 ρ 보다 항상 작게되도록 tilt angle을 조정하고 적절한 공구반경 R을 선정한다. ρ 는 곡면의 최소법선곡률반경으로 $\rho = \frac{1}{\kappa_n}$ 이며 κ_n 은 곡면의 최대법선곡률이다. Fig. 7에 볼록곡면과 오목곡면의 가공시 과절삭이 발생하는 모습을 표현하였다. 볼록곡면의 경우 공구반경의 대소 때문에 과절삭이 발생하지 않지만 공구의 진행방향이 적절히 선정되어야 과절삭을 방지할 수 있다. 오목곡면의 경우 공구반경이 곡면의 법선곡률반경보다 큰 경우 과절삭 (over-cut) 또는 미절삭 (under-cut, un-cut)이 발생하는 경우를 보여주고 있다. Fig. 7에

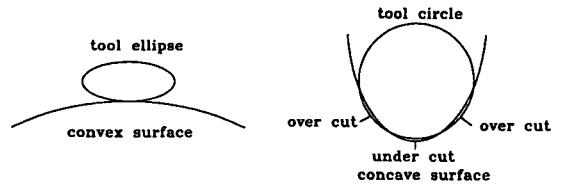


Fig. 7 Over-cut and under-cut for convex and concave surfaces

서 tilt angle이 90도 인 경우 ρ' 이 최소가 되지만 곡면의 곡률반경이 작으므로 공구의 진행방향과 관계없이 미절삭 또는 과절삭이 발생한다. 이런 경우 반경이 작은 공구를 선택하고 tilt angle을 크게하며 진행방향을 적절히 선택하여 과절삭과 미절삭을 방지하여야 한다.

5.5 Cusp 높이

절삭공구로 가공하고 나면 표면에 절삭되지 않은 부분이 남는데 그 부분의 꼭지점에서 법선방향으로 곡면까지의 높이를 cusp (scallop) 높이라 한다. Cusp 높이와 경로간격의 관계는 절삭공구를 ball end-mill을 사용할 때 문헌¹⁶에서 찾을 수 있으나 본 연구에서는 flat end-mill을 사용하여 cusp 높이를 구한다. Flat end-mill에서 가공이 되는 밀면은 원 이지만 cusp이 정의되는 방향에서 본다면 공구 원은 타원으로 보인다. 1차 pass와 2차 pass에 의해 형성되는 2개의 타원 사이에 절삭되지 않는 부분의 높이가 cusp 높이가 되는데 Fig. 8에 그 관계를 표시하였다.

Fig. 8에서 보듯이 파라미터의 정의역상에서 보면 1,2차 pass의 u방향의 파라미터는 서로 같을 지라도 3차원 좌표계에서 보면 그 위치가 달라질 수 있게된다. 파라미터에 의한 공구중심점의 위치와 공구축 벡터를 이용하여 2개의 타원을 3차원 좌표계의 YZ평면에 일치하도록 회전시켜 cusp 높이를 구한다. 이때 2개의 타원이 교차하는 점을 해석적으로 찾기 어려우므로 수치해석적으로 교차점을 찾는다. 2개의 타원이 교차한다면 그 교차점은 최대 4개까지 있을 수 있으나 그 중에서 3차원 좌표계의 Z 값이 가장 작은 점을 cusp 높이를 구하는 교차점으로 한

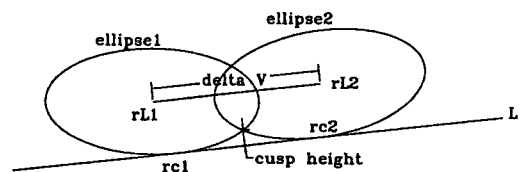


Fig. 8 Two ellipses and cusp height

다. 타원의 교차점을 구하기 위해 먼저 3차원 좌표계의 XY평면에 수직으로 놓인 공구원을 축벡터에 수직하도록 회전^{24,25}시키면 Fig. 8의 타원이 된다. cc1점의 접선벡터를 X축에, 법선벡터를 Z축에 일치시키면 타원은 YZ평면에 놓이게 된다. 2개 타원의 cc점을 연결하는 직선 L을 Y축에 일치하도록 회전시키면 cusp 높이는 교차점의 Z 좌표가 된다.

6 블레이드의 형상설계와 NC 공구경로 생성의 예

본 연구 결과의 전반적인 flowchart는 Fig. 9에 표현되어 있으며 프로펠러의 형상설계와 블레이드의 곡면합성, 공구경로생성으로 나누어 예시하였다.

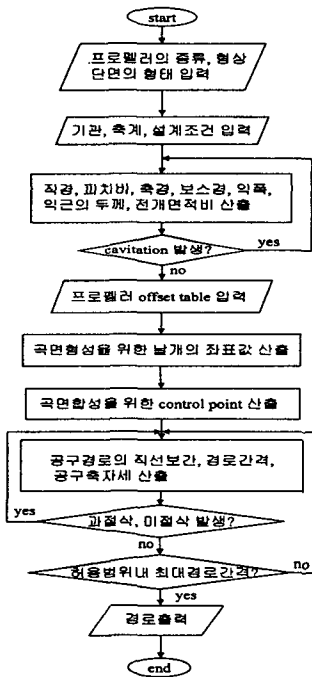


Fig. 9 Flowchart

6.1 프로펠러의 형상설계

프로펠러의 설계조건으로는 다음과 같은 사항이 결정되어야 한다. 날개 (blade)의 수가 결정되어야 한다. 프로펠러의 구조를 일체식으로 할 것인지, 혹은 조립식으로 할 것인지도 결정하여야 한다. 프로펠러의 소재로는 망간 황동이나 알루미늄 청동 및 기타 재료 등을 사용한다. 본

연구에서는 망간황동을 소재로 하여 중소형 선박에 많이 사용되는 조립식 MAU 단면의 4익 프로펠러를 대상으로 형상을 설계한다.

프로펠러의 추력을 구하기 위해 홀수와 배의 밑에서 프로펠러 축 중심까지의 높이를 1.9 [m], 홀수를 5.8 [m]으로 하고 25%의 sea margin을 고려한 상용출력은 7 노트 [knot]로 한다. 프로펠러 설계의 요구조건은 상용출력시 전달마력을 4,100 마력, 상용출력시 정격회전수를 150 [rpm]으로 가정하고 프로펠러 블레이드의 rake angle을 10도로 한다. 초기의 전개면적비 a_0 는 가장 많이 사용되는 0.55를 기준으로 하여 프로펠러의 직경을 계산한다. 식 3.1, 3.2, 3.4에 의해서 $Bp=74.1$, $\delta=93.79$ 이며, 프로펠러의 직경 D는 약 4.38 [m]이 된다. 피치비 $\frac{H}{D}$ 는 0.606이 되며 프로펠러 축중심에 미치는 압력 P_0 는 $14,337.6 [Kg/m^2]$ 가 된다. 식 3.26 및 3.27에 의해 $V=24.375$ 이고 식 3.25에 의해 $\sigma_B=0.463$ 이다. 식 3.28, 3.29, 3.30, 3.32에 의해 $T=39,890 [Kg]$ 이고, $\tau=0.17$, $A_p=7.575 [m^2]$, $a_p=0.5097$, $a_0=0.549$ 이다. 여기서 초기에 가정된 전개면적비 0.55가 a_0 에 근접하므로 $D=4.38 [m]$, $a_0=0.55$ 를 직경과 전개면적비로 채택한다. 식 3.11과 3.17에 의해 축경 $d=346 [mm]$, 보스경 $d_o=969 [mm]$, 보스비 $x_1=0.22$ 이며 식 3.18, 3.19, 3.20, 3.21에 의해 익근부의 익폭 $l=818 [mm]$, 두께 $t=180 [mm]$ 이다. 위의 결과를 요약하면 Table 2와 같다.

Table 2 Propeller diameter and expanded area ratio with calculation outputs

항목	계산 결과
Bp , 출력계수	74.1
δ , 각계수	93.79
D, 직경	4.38[m]
$\frac{H}{D}$, 피치비	0.6066
P_0 , 프로펠러 축 중심에 미치는 압력	14,337 [Kg/m ²]
v_a , 프로펠러의 전진속도	3.6 [m/sec]
u , 반경비 0.7의 날개의 회전속도	24.08 [r/sec]
V , 반경비 0.7의 프로펠러 전진속도	24.37 [m/sec]
σ_B , Burrill Cavitation 계수	0.46
T, 프로펠러가 발생해야할 추력	39,890 [Xg]
τ , 단위 추력계수	0.17
A_p , 프로펠러의 무영면적	7.575 [m ²]
a_p , 무영면적비	0.5097
a_0 , 전개면적비	0.549

있으면 등경곡선을 따라 경로를 생성하는 것이 편리하다. 그러나 이 경우 경로사이에 발생하는 cusp 높이가 정해진 오차의 범위 내에 있는지를 반드시 검토하여야 한다. 본 과제에서는 프로펠러 곡면이 파라미터로 표현되었으므로 파라메트릭 가공방식을 택하고 u방향의 Δv 등경곡선을 가공경로로 하고 방향은 익근부의 피치각을 고려하여 one way 방식을 택한다.

직선보간 길이는 허용오차를 고려하여 결정하여야 하며 곡면의 가공경로의 일부분을 원호로 가정하고 그에 해당되는 사이각을 구하여 보간하여야 한다. 앞절에서 구한 프로펠러의 직경이 4.38 [m]이므로 여기서는 선박 프로펠러의 ISO tolerance 규약을 고려하여 가공의 허용오차를 5 [mm]로 정하고 오차가 이 범위 이내에 있으면 만족하는 것으로 한다. Parametric 가공경로에서는 곡면의 법선곡률반경을 고려하여 파라미터의 증분이 계산되어야 한다. 여기서는 식 5.6과 5.9를 이용하여 사이각과 파라미터의 증분을 구한다.

경로간 간격은 cusp 높이가 허용오차의 범위 내에 오도록 결정하여야 한다. 본 과제에서는 절삭공구를 flat end-mill을 사용하므로 공구의 바닥 원이 보는 방향에 따라 타원이 되며 그 타원의 장반경과 단반경의 비가 달라지고 회전각이 달라지므로 매우 복잡하나 앞의 5.3과 5.5에서 전술된 결과를 이용하여 cusp 높이와 경로간 간격을 구한다. 각 patch 마다 파라미터의 증분을 계산하여 경로를 연결하면 계단모양이 형성되어 가공에 적합하지 않게 된다. 또 각 patch의 경계에 인접한 곳에서 cc점을 형성하면 경계선 주위의 cc점간의 직선보간길이가 지나치게 짧게 될 경우가 있다. 각 patch 간의 경계를 무시하고 한 row와 column 전체에서 파라미터의 증분을 계산하였다.

공구축 벡터는 앞의 5.1에 전술된 결과를 이용하여 구한다. 또한 곡면의 각 위치에서의 곡률반경과 공구반경을 반드시 비교하여 과절삭이 발생하는 지도 확인하여야 한다. 공구진행 방향으로 블레이드의 단면은 볼록 곡면이므로 5.4절에서 전술된 오목곡면의 과절삭은 발생하지 않으나 column 방향으로 보면 곡면이 오목곡면과 볼록곡면의 합성으로 되어있으므로 과절삭을 확인하여야 한다. 그러나 column 방향의 곡면의 법선곡률반경을 계산하여 보면 매우 크므로 초기의 사이각 α 를 적절히 유지하면 오목곡면에 의한 과절삭은 발생하지 않는다.

공구의 충돌은 공구와 작업물과의 충돌 혹은 ram과 작업물과의 충돌이 있을 수 있으나 이런 경우는 작업물이나 기계에 모두 치명적이 되므로 반드시 피하여야 한다. 경



Fig. 11 Cutting tool path for a blade

로생성시 충돌 가능성을 반복적으로 확인하고 경로를 simulation하여 충돌이 예상되는 위치를 찾아서 수정하여야 한다. 이상의 결과로 블레이드의 표면과 공구와의 접촉점에서의 공구의 위치좌표를 구하였다. 이 때에 구하여진 블레이드 가공의 공구경로를 중간 경로를 생략하여 간략히 점선으로 나타내어 Fig. 11에 표현하였다.

7 결 론

본 논문은 주어진 조건에 따라 프로펠러의 형상을 설계하고 블레이드를 composite Bezier surface로 곡면 modeling하여 5축 가공기에서 생산하는 방법에 대하여 연구하였다. 프로펠러의 설계가 매우 복잡하여 설계에 관한 도표가 많으나 이것들을 근사식으로 표현하여 사용자가 설계조건을 입력하면 프로펠러의 직경과 전개면적비, 기타 형상에 관한 여러 항목을 구하여 설계할 수 있도록 하였다. 프로펠러의 생산은 그라인더에 의한 연삭작업을 수가공에 의존하므로 가공시간이 매우 오래 걸리지만 NC 가공기에서 절삭 가공한다면 시간이 매우 단축될 것이다. 가공기에서 작업이 가능하도록 하기 위해서는 블레이드 표면이 수식으로 표현되어야 한다. 블레이드 표면의 형상을 수식화 하기 위해 곡면을 112개의 단위곡면으로 표현하고 각 patch들이 서로 부드럽게 연결될 수 있도록 composite Bezier patch로 합성하였다. 이 합성곡면의 data를 이용하여 파라메트릭 방식으로 5축 가공을 위한 공구경로를 산출하였다. 본 연구는 프로펠러의 형상설계와 가공에 소요되는 생산시간을 단축하는데 기여할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Theodorsen, T, Theory of Propellers, McGraw Hill, pp. 98-108, 1948.

2. Dyne, G. "An Experimental Verification of A Design Method for Ducted Propellers," ASME Symposium on Pumping Machinery for Marine Propulsion, Philadelphia, PA, USA, May, pp. 3-27, 1968.
3. Comstock, J. P., Principles of Naval Architecture, SNAME, pp. 273-454, 1967.
4. 조규중, 박명규, 선박프로펠러 설계법, 태화출판사, pp. 1-159, 1981.
5. 최병오, 이민기, 정종윤, "Propeller Blade 연삭 작업의 자동화 시스템 개발," 통상산업부 공업기반 기술과제 연구결과 보고서1, 2, 1995, pp. 1-65, 1996.
6. Korakianitis, T and Pantazopoulos, G. I., "Improved turbine-blade design techniques using 4th-order parametric-spline segments," CAD, Vol. 25, No. 5, pp. 289-299, 1993.
7. Vickers G. W., "Computer-aided manufacture of marine propellers," CAD, Vol. 9, No. 4, pp. 267-274, 1977.
8. 이민기, 최병오, 정종윤, 박근우, "프로펠러 연삭 작업을 위한 병렬-직렬 로봇암 개발," 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 2, pp. 146-158, 1996.
9. Farin, G., Curves and Surfaces for CAGD, 4th. edition, Academic Press, pp. 33-73, 1997.
10. Lasser D., and Hoschek, J., Fundamentals of Computer Aided Geometric Design, A K Peters, pp. 250-385, 1993.
11. 이진우, 컴퓨터 그래픽과 CAD, 영지문화사, pp. 235-266, 1994.
12. Choi, B. K., Surface Modeling For CAD/CAM, Elsevier, pp. 61-171, 1991.
13. Choi, B.K., Shin, H. and Yoo, W. S., "Visually smooth composite surfaces for an unevenly spaced 3D data array," Computer Aided Geometric Design, Vol. 10, pp. 157-171, 1993.
14. 박정환, "금형의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발에 관한 연구," 박사학위 논문, 한국과학기술원, pp. 1-92, 1995.
15. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공, 회중당, pp. 323-374, 1996.
16. Choi, B. K., Lee, C. S., Hwang, J. S., and Jun, C. S., "Compound surface modelling and machining," CAD, Vol. 20, No. 3, pp. 127-136, 1988.
17. 김광수, 최영환, "자유곡면 가공을 위한 CAD/CAM 시스템," 산업공학회지, Vol. 17, No. 1, pp. 37-49, 1991.
18. 최병규, 김대현, "자유곡면 절삭을 위한 경제적인 CL 데이터의 계산," 대한산업공학회지, Vol. 9, NO. 2, pp. 27-35, 1983.
19. Li, S. X and Jerard, R. B., "5-axis machining of sculptured surface with a flat-end cutter," CAD, Vol.26, No. 3, pp. 165-178, 1994.
20. Cho, H. D., Jun, Y. T., and Yang, M. Y., "Five-axis CNC milling for effective machining of sculptured surfaces," International Journal of Production Research, Vol. 31, No. 11, pp. 2559-2573, 1993.
21. Hwang, J S, "Interference-free tool-path generation in the NC machining of parametric compound surfaces," CAD, Vol. 24, No. 12, pp. 667-676, 1992.
22. Faux, I. D. and Pratt, M. J., Computational Geometry for Design and Manufacture, Ellis Horwood, pp. 100-101, 1981.
23. Vickers, G. W. and Quan, K. W., "Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining," Transaction of ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 22-26, 1989.
24. Anand, V. B., Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers, John Wiley & Sons, pp. 93-128, 1993.
25. Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K., and Hughes, J. F., Computer Graphics 2nd. edition, Addison-Wesley, pp. 201-228, 1996.