

# 금형 자유곡면 가공에서의 공구간섭 제거 Removal of tool interference area for machining freeform surfaces of mold shape

○ 장 봉 준, 김 희 중 (한국해양대학교 대학원 기계공학과)

정 재 현 (한국해양대학교 기계시스템 공학부)

## Abstract

The most important problem in NC machining of a freeform mold surface is removal of tool interference. In this paper three methods are introduced to remove self-intersection on offsetted freeform surface for 3-axis NC. All methods are using intersectional offset curves on original offset surface. The fast method is sequential loop check using two lines which have two neighbor points of intersectional offset curves.

Key Words : parametric freeform surface(매개변수 자유곡면), offset(오프셋), tool interference(공구간섭)  
3-axis NC machining(3축 NC가공), self-intersection(자체교집)

## 1. 서 론

CAD 시스템에 의해 생성된 금형형상을 정확하게 가공하기 위해서 CAM 시스템은 오프셋 형상의 간섭 문제를 해결해야 한다. 특히 매개변수로 표현된 자유형상의 경우는 일반적인 해석 형상에 비하여 그 오프셋 생성에 많은 어려움이 있다. 가장 일반적인 문제는 자유형상의 오프셋 생성에 대하여 각종 공구의 형상에 따른 간섭 영역의 파악과 그 제거이다.

본 연구에서는 CAD 시스템에서의 자유형상의 대표적인 예인 베제(Bezier)곡면과 B-스플라인(spline)곡면의<sup>1), 2)</sup> 3축 가공을 위한 오프셋을 생성하였고, 생성된 오프셋곡면에서의 공구간섭을 제거하기 위한 세 가지 방법을 제시하였다.

## II. 자유형상 곡선의 오프셋

곡면의 가공도 3축 NC 기계에서는 곡선 방향으로 이루어지므로 먼저 곡선의 오프셋을 생성한다. 오프셋 생성은 사용되는 가공 공구에 따라 그 결과가 달라지므로 본 연구에서는 대표적인 세가지 공구의 경우에 대해서만 적용하였다. Fig.1은 본 연구에서 대상으로 한 세가지 공구를 나타내며, 각 공구 내부의 점은 공구의 제어점을 표시한 것이다. Fig.2에서는

세가지 공구형상에 대한 자유 곡선의 오프셋 생성시의 차이를 나타낸다. 볼-엔드밀(ball-end mill)과 동일한 오프셋을 플랫-엔드밀(flat-end mill)이나 불노즈-엔드밀(bull nosed-end mill)에 적용하면 Fig.2와 같이 미가공부분이 생기게 된다. 평면이나 공간의 곡선  $f(x)$ 상의 임의의 점  $(x,y)$ 에 대한 접선에 수직하는 법선  $N$ 을 아래와 같이 정의한다.<sup>3)</sup>

$$N = \frac{1}{f'(x)} \quad (1)$$

$\alpha$ 는 법선과 수평면 사이의 각( $\alpha = \tan^{-1}N$ )으로 오프셋의 좌표점은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= x \pm d \cos \alpha \\ \Delta y &= y \pm d \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

볼-엔드 밀에 의한 가공의 경우, 곡선상의 한 점  $p$ 의 오프셋점  $p'$ 의 계산은 점  $p$ 에 대하여 법선 방향으로 오프셋 거리  $d$ 만큼 증감한 것과 같다. 이러한 볼-엔드 밀은 제어점에서 가공물과의 접촉 거리가 공구 반경  $R$ 로 동일하므로 곡선의 각 점에서 오프셋거리가 일정하다.

플랫-엔드 밀의 공구 경로는 법선 벡터의 계산없이 공구 반경만큼만 오프셋시키면 되고, 불노즈-엔드 밀은 법선 벡터 방향으로 라운드 반경만큼 이동한 후, 공구 반경과 라운드 반경  $r_r$ 의 차만큼 평행이동시키면 된다. Fig.3에서는 볼-엔드 밀에 대한 오프셋

의 정의를 나타내었다.

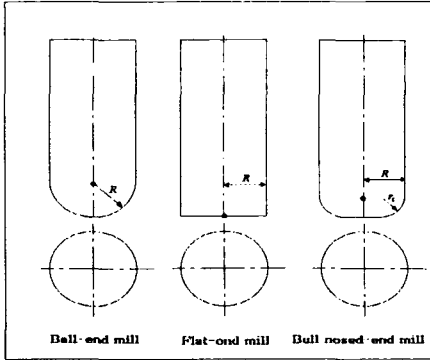


Fig.1 General tool for NC machine

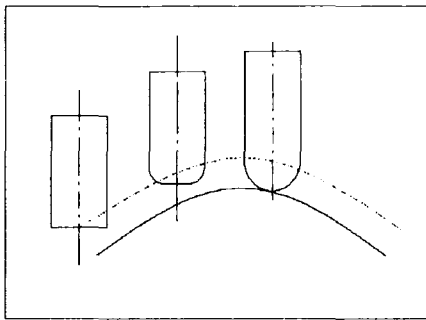


Fig.2 Normal offsets of general tools

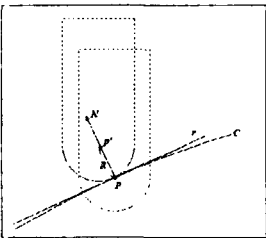


Fig.3 Definition of offset for ball-end mill

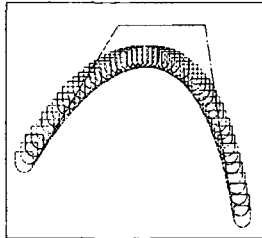


Fig.4 Contour of ball-end mill

각각의 공구에 대한 오프셋식을 표현하면 다음과 같다.<sup>4)</sup>

$$\begin{aligned}
 \text{볼-엔드 밀: } & p'_{\text{end}} = p + (N \times R) \\
 \text{플랫-엔드 밀: } & p'_{\text{f-end}} = p \pm R \\
 \text{볼노즈-엔드 밀: } & p'_{\text{n-end}} = p + (N \times r_1) \pm (R - r_1)
 \end{aligned} \quad (3)$$

Fig.4에서는 볼-엔드 밀에 의한 곡선 형상의 3축 NC 가공의 예를 나타내었다.

### III. 자유형상 곡면의 오프셋

곡면  $S(u,v)$ 의 오프셋 곡면도 곡선의 경우와 같이 모

든 점  $p$ 에 대한 오프셋점  $p'$ 의 생성으로 정의된다. 볼-엔드 밀에 의한 가공의 경우, Fig.5에서처럼 곡면  $S(u,v)$ 상의 한 점  $p$ 에서 접하는 평면을  $S_p$ 라 하면, 오프셋점  $p'$ 는 접평면  $S_p$ 에서 법선 방향으로 공구 반경  $R$  만큼 떨어진 점이다. 곡면  $S(u,v)$ 의 한 점  $p$ 에서의 접선벡터  $T$ 는 아래 식으로 표현되고,

$$T_u = \frac{\frac{\partial f(u,v)}{\partial u}}{\left| \frac{\partial f(u,v)}{\partial u} \right|} \quad (4)$$

$$T_v = \frac{\frac{\partial f(u,v)}{\partial v}}{\left| \frac{\partial f(u,v)}{\partial v} \right|}$$

점  $p$ 에서의 법선벡터  $N$ 은

$$N = \frac{(T_u \times T_v)}{|T_u \times T_v|} \quad (5)$$

로 된다.<sup>3)</sup>

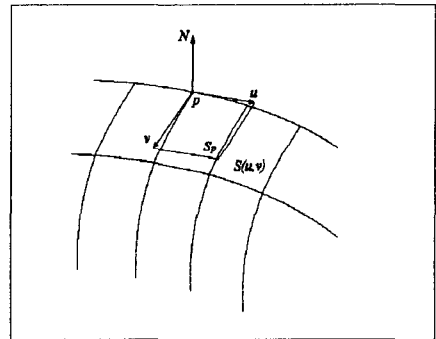


Fig.5 Definition of tangent and normal vector on surface

본 연구에서는 생성된 곡면의 각 포인트에 대한 법선 오프셋을 수행하므로써 모든 매개변수 형태의 곡면에 대한 오프셋 곡면을 생성할 수 있었다.

### IV. 오프셋 곡면의 분할과 오프셋 곡선의 꼬임 검사

자유 곡선 가공에 있어서 공구 간섭은 Fig.6과 같이 두 자유 곡선이 합성되는 경계 영역에서 접선 불연속성이 발생하는 곳 (a)와 곡선 사이의 공간이 오프셋거리보다 작은 부분 (b), 그리고 곡률 반경이 오프셋거리보다 작은 곳 (c)에서 발생하게 되며, 이러한 경우에 오프셋 곡선의 꼬임이나 교차가 발생하게 된다.<sup>5), 6)</sup> 곡면에서 꼬임과 이러한 교차의 발생을 검사하는 것은 계산 과정이나 데이터가 방대하므로 본 연구에서는 곡면을 여러 개의 평면으로 분할하여 각 평면에서의 곡선에 대한 검사를 수행하는 방법을 사

용하였다.

먼저 Fig.7과 같이 임의 가공 평면( $x-z$ 면 혹은  $y-z$ 면)을 설정하여, 곡면을 여러 개의 평면으로 분할하여 읍셋 곡면과 각 가공 평면이 교차하여 생기는 교차곡선  $C_i$ 를 구한다.

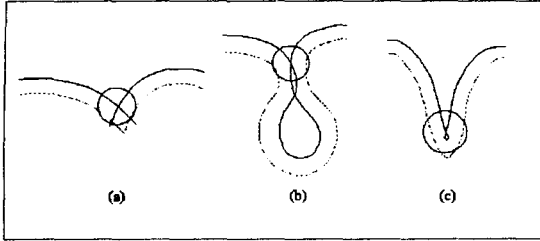


Fig.6 Tool interference area of offset curves

Fig.8은 읍셋 곡면  $S'$ 와 가공 평면이 교차함으로써 정의되는 읍셋 곡선  $C_i$ 를 나타낸다.  $C_i$ 를 검사하여 꼬임이나 교차가 발생하는 점을 찾아 내어 제거하므로써 읍셋 곡면의 공구 간섭을 피할 수 있게 된다. 꼬임점을 찾기 위해 Fig.8과 같이  $C_i$ 의 가공범위인 최대값  $z_{max}$ 와 최소값  $z_{min}$ 를 계산한다. 이것은 Fig.9에서와 같이 읍셋 곡면이  $x-y$  평면에 대해 두 축과 평행하지 않을 경우, 교차 검사의 시작과 종료 부분에서 가공 평면이 읍셋 곡면의 일부와 교차하게 되므로 교차하지 않는 부분에 대한 계산을 줄이는 효과를 갖는다.

검사영역이 정해지면  $C_i$ 의 각 점들을 연결하고 있는 선분의 기울기를 구하고 그 변화를 기억한다. 꼬임이 발생하는 경우의 기울기는 -에서 +로, +에서 -로, 그리고 -에서 +로 세 번 변하는 경우이다.

### 1. 두 점의 거리를 이용한 꼬임검사

꼬임이 발생할 경우, 기울기가 변하는 점에서  $z$ 축과 평행인 직선과  $C_i$ 가 만나는 점을 구하고 그 점을 꼬임 검사 시작점으로 정한다. 검사 시작점의  $z$  값에 대한  $x$ 축과 평행인 직선과  $C_i$ 와의 두 교점을 계산하여, 두 교점의 길이가 정의된 한계치보다 작을 경우는 검사를 중지하고 두 교점의 중점을 꼬임 점으로 정의한다. Fig.12는 Fig.10과 Fig.11을 동시에 나타낸 것으로 실제 형상에서 발생하는 공간 간섭의 해결 순서를 Fig.13 ~ 15에서 나타내었다. Fig.13는 읍셋 곡면의 검사 시작 부분으로 기울기의 변화가 일정하므로 꼬임이 발생하지 않음을 알 수 있다. Fig.10과 11은 매개변수 베제곡면과 불-엔드 밀에 의한 읍셋 곡면을 나타낸다.

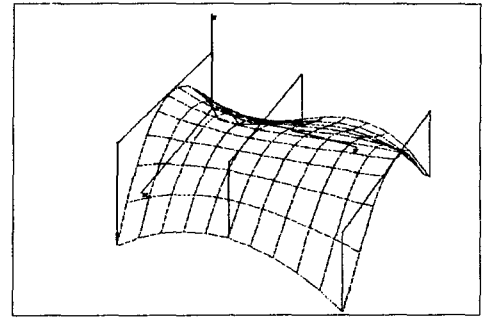


Fig.7 Divide from offset surface by drive plane

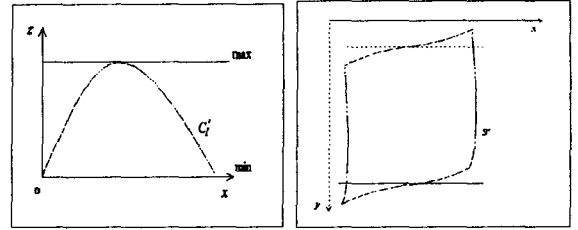


Fig.8 Drive plane and intersection offset curve

Fig.9 The surface not parallel with  $x-z$  axis

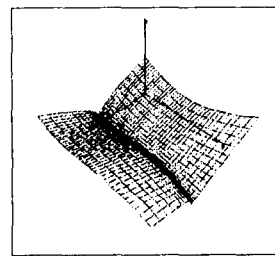


Fig.10 Parametric Bezier surface

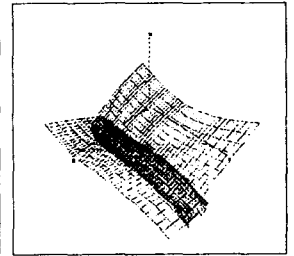


Fig.11 Offsetted Bzier surface

Fig.14의 경우는 꼬임은 없으나 공구 간섭의 발생이 예상되며, 간섭이 발생하는 경우는 기울기 변화점 뒷 부분을 삭제한다. Fig.15는 완전한 꼬임이 발생하는 곡면 내부의 상태이다.

이상에서 기울기가  $+ \rightarrow - \rightarrow +$ 로 변화되면 꼬임이 발생함을 알 수 있다. 이러한 부분에서는 꼬임 발생점 이후에 대한 삭제를 수행하게 된다.

### 2. 직선과 구간분할을 이용한 꼬임검사

두 점의 거리를 이용하여 꼬임을 검사하는 방법은 꼬임점을 확실하게 찾을 수는 있지만 반복계산과 증분값에 따라 계산시간이 차이가 크게 난다.

이를 보완하기 위하여 Fig.16(a)에서와 같이  $C_i$ 의 점간 선분 기울기가 변하는 두 점에서  $z$ 축과 평행으로 직선  $L_1$ 과  $L_3$ 를 그어 각각의 직선이  $C_i$ 와 만나

는 점을 꼬임검사 시작점으로 정하고 점간 선분 기울기가 +인 부분  $B$ 와 -인 부분  $A$ 로 분할한다.

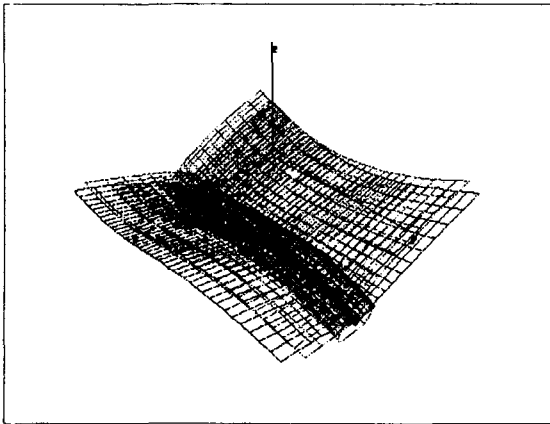


Fig.12 Normal offsetting of general parametric surface

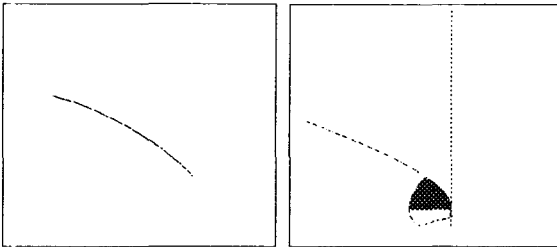


Fig.13 Intersection curve of start area

Fig.14 Tool interference in intersection curve

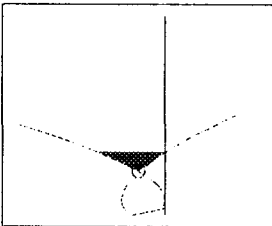
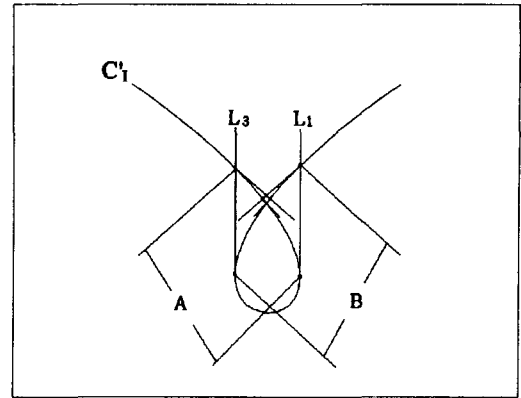
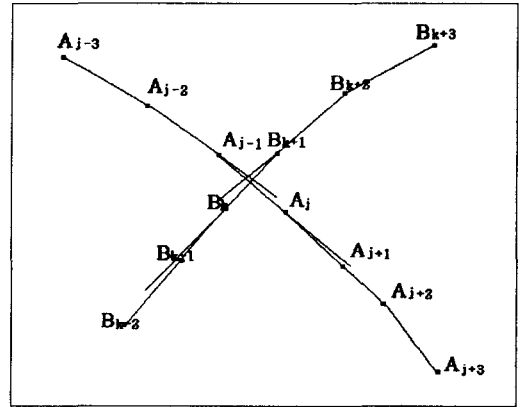


Fig.15 Intersection curve in middle area

이를 확대한 Fig.16(b)에서  $A$ 는 점  $A_1, A_2, \dots, A_{j-1}, A_n$ 으로 구성되고,  $B$ 는 점  $B_1, B_2, \dots, B_{m-1}, B_m$ 으로 구성된다.  $A_{j-2}$ 에서 점간 선분은  $\overline{A_{j-1}A_{j-2}} (1 \leq j \leq n)$ 이 되고 이것의 연장직선은 점  $B_{k+1}$ 과  $B_{k+2} (1 \leq k \leq m)$ 사이를 교차하게 된다. 이 때 교차점에서의 연장직선과  $A$ 구간과 만나는 점은  $A_{j-1}$ 과 교차점  $A_j$ 사이에 존재한다. 이 과정을 반복하면 두 구간의 교차점은 두 점간 선분  $\overline{A_{j-1}A_j}$ 와  $\overline{B_kB_{k+1}}$ 의 교차점으로 수렴하게 되어 꼬임점은 두 점간 선분의 교점으로 정의 된다. 이 방법은  $L', L_3$ 와  $C'_1$ 의 각 교점이 존재하여야 하고, 그 교점의 점간 선분이 반드시 각각의 구간을 교차해야 한다는 조건을 만족해야 한다.



(a)



(b)

Fig.19 Checking self-intersection

### 3. 점간 선분을 이용한 순차적인 꼬임검사

이 방법은 점간기울기가 세 번째 변하는 점, 즉  $C'_1$ 가 꼬임점을 향해 진행하는 점에서 점간 선분의 연장직선과  $A$ 구간과의 교차여부를 순차적으로 검사하는 방법이다. 이 방법은 검사점 선분의 연장직선이  $A$ 구간과 교차하여 생성한 교차점이 검사점의 선분 내에 존재해야 한다. 이 방법은 점간 선분의 기울기 데이터를 이용하여 검사여부를 판단하고 완전한 꼬임 없이 공구간섭이 발생하는 경우에도 공구간섭부분을 제거할 수 있다. Fig.17에서와 같이 검사점  $B_{k-2}$ 와  $B_{k-1}$ 을 지나는 직선은  $A$ 구간의 점  $A_{j-2}$ 와  $A_{j-1}$  사이를 교차하지만 교차점이  $B_{k-2}$ 와  $B_{k-1}$  내부에 있지 않으므로 다음 점의 계산으로 진행된다.  $B_{k+1}$ 과  $B_{k+2}$ 의 선분은  $A$ 구간과의 교차점이 선분 내부에 존재하므로 꼬임점이라 판단하고 검사를 중지한다. 또, 검사시작점에서  $C'_1$ 의 끝점까지 선분의 연장직선이  $A$ 구간과 교차하지 않을 경우는 꼬임이 발생하지 않는다고 판단하고  $C'_1$ 의 형태에 따라 점간 선분의 기울기가 첫 번째 변하는 점이나 세 번째 변하는 점

에서 그 앞 부분 또는 뒷 부분을 제거한다.

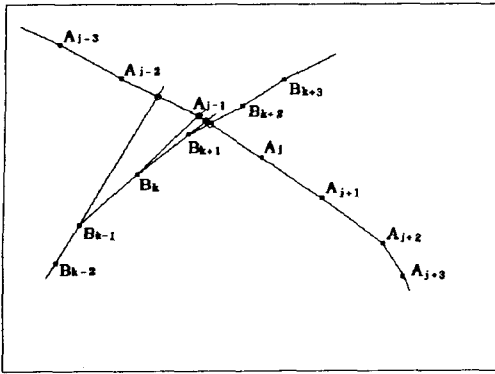


Fig.17 Sequential intersection checking

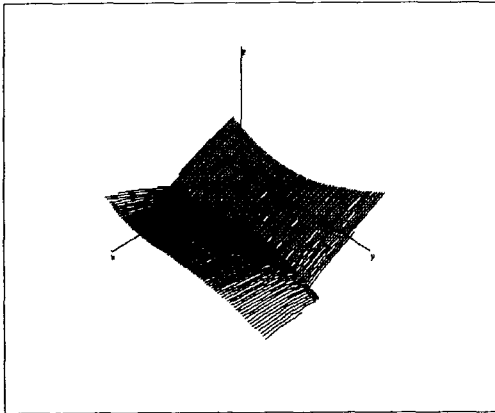


Fig.18 Offset surface after removing tool interference

Table 1은 Fig.12의 예를 본 논문에서 제시한 세 가지 방법으로 50개 및 100개의 가공평면으로 분할하여 꼬임검사를 실행했을 경우의 계산 시간을 비교한 것이다.

본 논문에서는 방법 3인 점간선분을 이용한 순차적 검사가 다른 두 방법보다 꼬임을 찾는데 훨씬 빠른 결과를 보여주었다.

	방법1		방법2		방법3	
가공평면의 분할수	100	50	100	50	100	50
계산시간 (초)	34	18	17	9	15	7

Table 1 Calculation times of presented methods

Fig.18은 본 논문에서 제시한 방법으로 공구간섭 검사를 수행하여 꼬임을 제거한 읍셋 곡면을 보인 것이다.

## V. 결론

본 연구는 매개변수 곡면에 대한 읍셋 곡면의 생성에 있어서의 공구 간섭검사 알고리즘을 제안한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 모든 매개변수 자유형상을 범선 읍셋하여 3축 NC 가공에 이용할 수 있는 가공정보를 생성할 수 있었다. 또한 사용되는 각 공구에 대하여 공구의 특징에 맞는 읍셋 생성이 가능하도록 하였다.
2. 곡면 가공의 어려움을 피하기 위해 가공 평면과 읍셋 곡면의 교차를 이용하여 교차 읍셋 곡선을 생성하고 이를 이용하여 간섭 영역에 대한 꼬임과 교차 발생의 문제를 해결하기 위한 세가지 방법을 적용하였다.
3. 읍셋곡면의 꼬임과 제거를 위해 본 연구에서 제시한 1) 두 점의 거리를 이용한 꼬임검사 2) 직선과 구간분할을 이용한 꼬임검사 3) 점간 선분을 이용한 순차적인 꼬임검사 중 세 번째 방법이 가장 빠르게 읍셋곡면의 간섭제거를 수행하였다.

### 참고문헌

1. Vera. B. Anand, *Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers*, John Wildy & Sons, Inc, 1993
2. Y. J. Chen, B. Ravani, *Offset Surface Generation and Contouring in Computer-Aided Design*, CAD, Vol. 109, 1987
3. Josef Hoschek, *Offset curves in the plane*, CAD, Vol 17, No. 2, 1985
4. K. Tang, C. C Cheng, Y Dayan, *Offsetting surface boundaries and 3-axis guoge free surface machining*, CAD, Vol. 27, No. 12, 1995
5. S. Aomura, T Uehara, *Self-intersection of an offset surface*, CAD, Vol. 22, No. 7, 1990
6. H. J. Kim, J. H. Jeong, *The Generation of Machining Information with Shape Control Properties of B-Spline*, 한국해양대학교 논문집 Vol. 16, 1994