

포켓 가공을 위한 NC 공구경로의 프로그램 개발

오 선*, 권영웅⁺

(논문접수일 2003. 1. 30, 심사완료일 2003. 5. 12)

NC Tool Paths Program Development for the Pocket Machining

Seon Oh*, Young-Woong Kwon⁺

Abstract

Pocket machining is metal removal operation commonly used for creating depressions in machined parts. Numerically controlled milling is the primary means for machining complex die surface. These complex surfaces are generated by a milling cutter which removes material as it traces out pre-specified tool paths. To machine a component on a CNC machine, part programs which define the cutting tool path are needed. This tool path is usually planned from CAD, and converted to a CAM machine input format. In this paper I proposed a new method for generating NC tool paths. This method generates automatically NC tool paths with dynamic elimination of machining errors in 2½ arbitrary shaped pockets. This paper generates a spiral-like tool path by dynamically computing optimal pockets of the pocket boundary contour based on the type and size of the milling cutter, the geometry of the pocket contour and surface finish tolerance requirements. This part programming system is PC based and simultaneously generates a G-code file.

Key Words : NC(수치제어), CAD(컴퓨터원용설계), CAM(컴퓨터원용생산), Tool Path(공구경로)

1. 서론

포켓 가공은 재료 내부의 불필요한 부분을 제거하여 원하는 형상을 얻어내는 방법으로서, 포켓의 형상은 선과 호의 조합으로 구성된 자유형상 또는 포켓 내부에 아일랜드가 존재하는 복잡한 형상에 이르기까지 다양하다.

이처럼 다양한 형상의 포켓을 CAM 시스템을 이용하여 가공하기 위해 공구경로를 생성하는 연구는 주요한 부분의 하나라고 할 수 있다.

포켓 가공에 대한 기존의 공구경로 생성방식은 contour-parallel milling과 direction-parallel milling으로 대별된다^(1,2,10).

* 주저자, 서일대학 자동차과 (ohseon@seoil.ac.kr)

주소: 131-702 서울시 중랑구 면목 8동 49-3

+ 서일대학 자동차과

전자의 경우 Woodwark⁽³⁾과 Preiss⁽⁴⁾는 포켓 가공은 매우 복잡한 상황이 많기 때문에 모든 문제점을 자동으로 해결할 수 있는 시스템을 구축하기가 어렵다고 하였으며, Persson⁽⁵⁾은 bisector를 이용하여 포켓을 몇 개의 구역으로 구분하는 bisector skeleton을 이용하여 읍셋을 하였고, Held⁽⁶⁾는 Voronoi diagram을 이용하여 포켓 영역을 Voronoi polygon으로 구분하여 기존에 있던 읍셋 루프의 어려움을 해결하였다. 후자는 읍셋 방식에 비해 복잡한 형상에 대해서도 경로를 보다 편리하게 만들 수 있다는 이점으로 아일랜드를 포함하는 포켓에 대해서 이 방식을 이용하지만 공구가 아일랜드를 지나 포켓 내부로 진입하는 부분은 드릴링 작업이 필수적이기 때문에 가공시간에 많은 영향을 미친다.

Kim과 Jeong⁽⁷⁾은 여러 개의 아일랜드와 cubic B-spline 곡선으로 구성된 자유곡면을 포켓 가공하기 위한 공구경로 생성 절차를 제시하였으며, Harenbrook⁽⁸⁾에 따르면 전체 기계부품의 80% 이상이 2차원 경로제어를 이용하여 가공될 수 있다고 하였다.

본 연구의 주요한 특징은 아일랜드를 포함하지 않은 임의의 2차원 포켓에 대하여 공구 형식, 직경, 포켓 윤곽의 형상과 정삭에 필요한 표면공차를 부여하여 포켓 경계윤곽의 최적화 동적읍셋(dynamic offset)을 구하기 위한 프로그램을 개발하여 실제 가공에 적용할 수 있는 G-code 파일을 얻어 내는 것이다. 따라서 가공 과정에서 발생할 수 있는 언더컷이나 오버컷을 줄일 수 있으며, 불필요한 G-code를 제거하여 가공시간을 단축시키므로써 원가절감과 생산성 향

상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 관련이론

2.1 파트프로그래밍

파트프로그래밍이란 공정계획이 서술된 작업지시서에 해당되는 것으로서, CAM과 통합 CAD/CAM 프로그램은 전처리 단계에서 CAD로부터 APT나 공구위치 파일을 직접 출력하는 부분을 정의하고 후처리 단계에서 절삭속도, 이송속도등과 같은 부가적인 변수들이 G-code 파일을 만들기 위한 프로그램을 이용하여 공구 위치 파일에 추가된다⁽⁹⁾.

Fig. 1은 본 연구에서 제시된 프로그램의 흐름도로서 가공하고자하는 공작물의 전체 모서리 수를 입력하고 공작물의 형상에 따른 좌표값, 선분의 종류와 결합방법에 대한 데이터를 입력하므로써 각도와 최적화 동적 읍셋 거리를 계산하여 G-code를 출력한다.

2.2 공작물 윤곽의 수학적 정의

공구경로를 생성하는데 있어서 먼저 공작물의 형상을 수학적으로 정의해야 하므로 포켓의 경계 윤곽을 직선과 원호로 구성된 일반적인 식으로 정의한다. Fig. 2에서와 같은 직선과 원호 부분은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Ax + By + C &= 0 \\ x^2 + y^2 + 2Dx + 2Ey + F &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

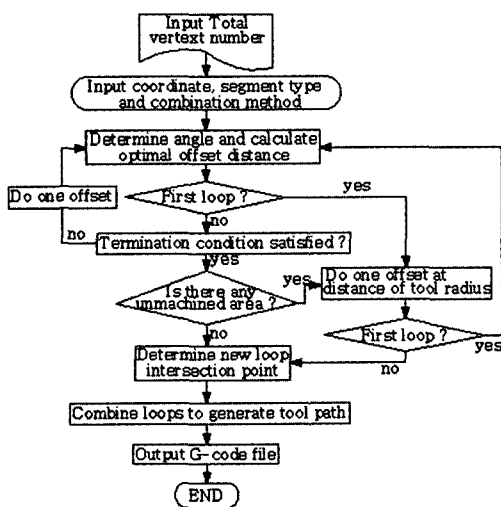


Fig. 1 Flowchart of system

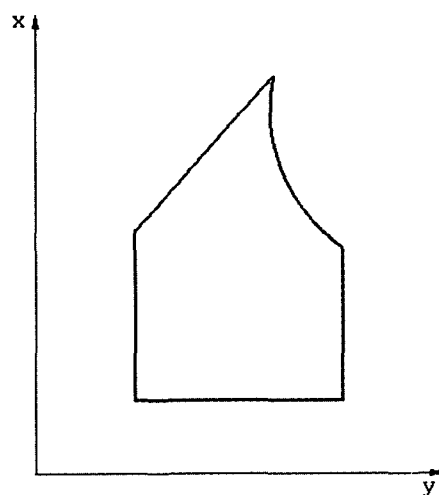


Fig. 2 Mathematical representation of contour

2.3 경계윤곽 선분의 분류

모든 직선과 원호는 두 방향으로 오프셋 될 수 있으나 하나의 방향만을 선택하여 윤곽내에서 각 선분에 대해 의도한 오프셋 방향을 지정한다. 이것은 파트프로그래밍에서 윤곽 선분이 먼저 분류되었고, 오프셋 방향에 따라 positive와 negative의 선분으로 표시되기 때문이다.

2.3.1 직선의 분류

Fig. 3의 포켓 윤곽에서 오프셋 방향에 따라 양, 음으로 분류하였다. 원점 방향으로 오프셋 될 경우에는 negative, 반대 방향일 경우에는 positive로 분류된다. 임의의 선분에 대한 양 끝점의 좌표가 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 라 하면, 선분에 평행한 오프셋 간격 d 는

$$c' = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (2)$$

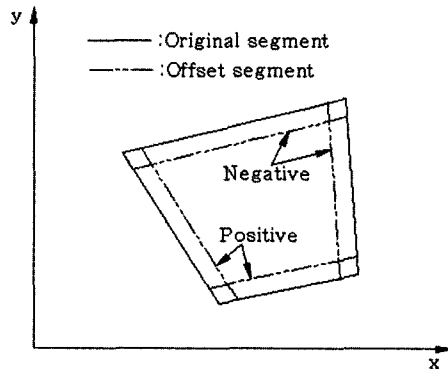


Fig. 3 Classification of line segment

2.3.2 원호의 분류

원호에 대한 오프셋은 중심이 고정된 상태에서 반경의 변화만을 의미한다. Fig. 4에서 오프셋 선분이 본래의 반경에 비해서 크면 positive, 작을 때는 negative로 분류된다.

(1) 중심점 결정

Fig. 5에서 원호에 대한 양 끝점 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 와 원호의 반경 r 에 대해서 두 개의 중심 $(m_1, n_1), (m_2, n_2)$ 가 존재할 때, 선분의 대한 식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} (x_1 - m)^2 + (y_1 - n)^2 &= r^2 \\ (x_2 - m)^2 + (y_2 - n)^2 &= r^2 \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 중심점 선택

두 개의 중심 중에서 하나를 중심으로 선택해야 되므로 호에 대한 두 점과 반경으로부터 중심점을 구하고 현의 방

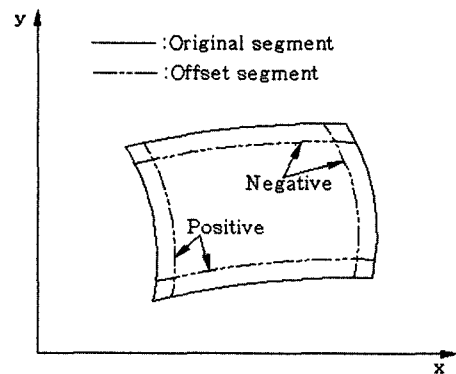


Fig. 4 Classification of arc segment

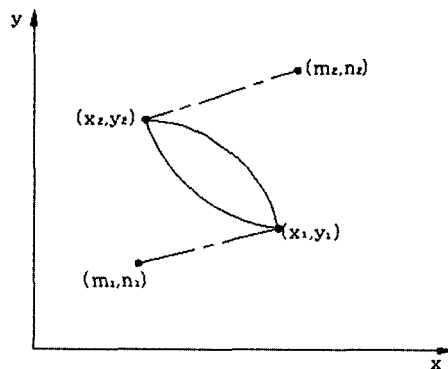


Fig. 5 Possible center point

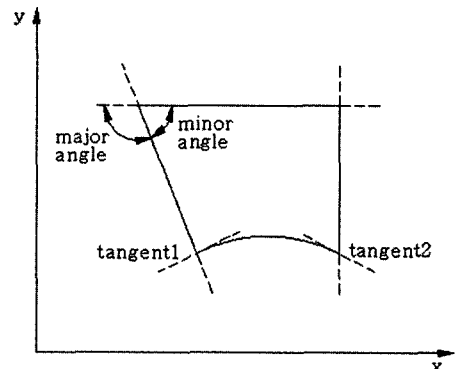


Fig. 6 Contour vertex angles

정식으로부터 수직거리를 구하여 공작물 포켓의 형상에 대한 반경 변화에 따라 하나를 선택한다.

$$(m_1, n_1) \text{에서의 수직거리} = \frac{|Am_1 + Bn_1 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

$$(m_2, n_2) \text{에서의 수직거리} = \frac{|Am_2 + Bn_2 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

2.4 교차점 각도

Fig. 6에서 읍셋 간격은 경계윤곽에서 인접한 선분사이에서 이루는 최소각의 함수이다. 교차점에서 최대오차는 최소각 부분에서 발생하므로 윤곽의 모든 교차점 각이 결정되면 최소각이 임계읍셋의 계산을 위해 선택된다⁽⁹⁾.

$$\tan \theta = \frac{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2}{1 + \tan \alpha_1 \tan \alpha_2} \quad (4)$$

α_1, α_2 : 선분의 양 끝에서 x축과 이루는 기울기각

2.4.1 Line-Line

Fig. 7에서와 같이 선과 선의 결합에 대한 사잇각은 다음과 같다.

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - \frac{y_2' - y_1'}{x_2' - x_1'}}{1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \frac{y_2' - y_1'}{x_2' - x_1'}} \right\} \quad (5)$$

2.4.2 Line-Arc

Fig. 8은 선과 호의 결합으로서 사잇각은 다음식을 이용한다.

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} + \frac{x_1 - m}{y_1 + n}}{1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \frac{x_1 + m}{y_1 + n}} \right\} \quad (6)$$

$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$: |의 기울기

$-\frac{x_1 + m}{y_1 + n}$: Arc의 시작점에서 접선의 기울기

2.4.3 Arc-Line

Fig. 9는 호와 선의 결합으로서 다음과 같은 식으로 구한다.

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\frac{x_2 + m}{y_2 + n} - \frac{y_2' - y_1'}{x_2' - x_1'}}{1 - \frac{x_2 + m}{y_2 + n} \frac{y_2' - y_1'}{x_2' - x_1'}} \right\} \quad (7)$$

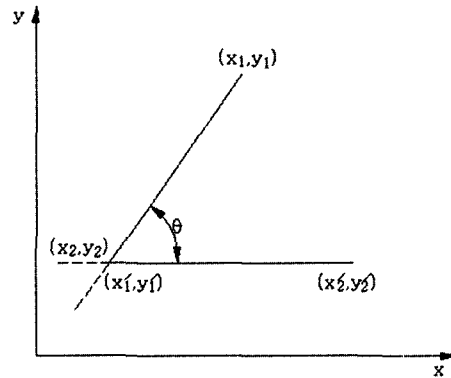


Fig. 7 Line-Line vertex angles

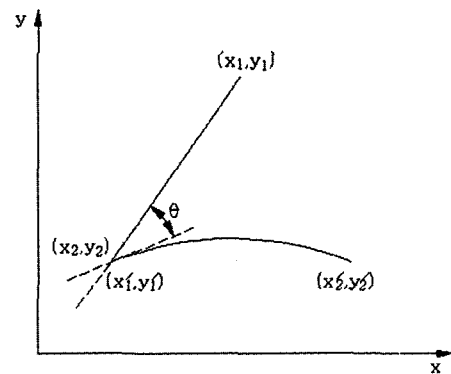


Fig. 8 Line-Arc vertex angles

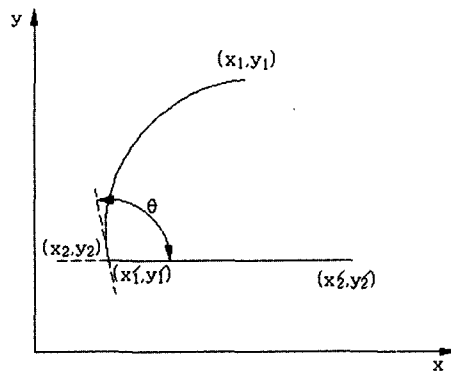


Fig. 9 Arc-Line vertex angles

$-\frac{x_2+m}{y_2+n}$: Arc 의 끝점에서 접선의 기울기
 $\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$: | 의 기울기

2.4.5 기울기와 각도의 알고리즘

```

IF segment_type = line
  IF  $x_1 - x_2 = 0$ 
    slope = 90
  ELSE
    slope =  $\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ 
ENDIF
IF segment_type = arc
  IF  $y_1 - n = 0$ 
    first slope = 90
  ELSE
    first slope =  $-\frac{m - x_1}{n - y_1}$ 
  IF  $y_2 - n = 0$ 
    second slope =  $-\frac{m - x_2}{n - y_2}$ 
ENDIF
IF vertex = Line-Line
   $k_1, k_2$  = slope of each line
IF vertex = Line-Arc
   $k_1$  = slope of line,  $k_2$  = first slope of arc
IF vertex = Arc-Line
   $k_1$  = second slope of arc,  $k_2$  = slope of line
IF vertex = Arc-Arc
   $k_1$  = second slope of arc,  $k_2$  = first slope of arc
IF  $k_1 = 90$  and  $k_2 \neq 90$ 
  angle =  $|\tan^{-1}k_2 - 90|$ 
IF  $k_1 \neq 90$  and  $k_2 = 90$ 
  angle =  $\tan^{-1}k_2 + 90$ 
IF  $k_1 \neq 90$  and  $k_2 \neq 90$ 
  IF  $k_1 \times k_2 = -1$ 
    angle = 90
  ELSE
    angle =  $\tan^{-1} \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 k_2}$ 
    IF angle < 0
      angle = angle + 180
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

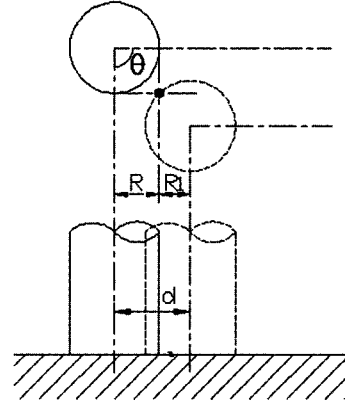


Fig. 10 Critical offset distance of flat end milling cutter

2.5 최적 입계옵셋

밀링가공에서 보편적으로 사용되고 있는 공구의 형식은 평면 밀링, 볼 엔드밀링과 일반화된 엔드밀링 커터이다. 볼 엔드밀링 커터는 대부분 곡면 가공에서 사용되는 반면에 일반화된 엔드밀링 커터와 평면 밀링커터는 평면가공에 사용된다. 포켓가공에서 최적 입계옵셋을 설정하는 것은 언더컷과 오버컷을 방지하고 가공시간을 단축시키므로써 생산성을 향상시키는 주요한 과정이다.

Fig. 10은 평면 엔드밀링 커터에 대하여 모서리에서 최적 입계옵셋을 구하는 방법으로 다음과 같다.

$$R_1 = R \sin \frac{\theta}{2} \tag{9}$$

$$d = R(1 + \sin \frac{\theta}{2}) \tag{10}$$

R : 공구반경(tool radius)

θ : 모서리각(vertex angle)

d : 옵셋거리(offset distance)

3. 프로그램의 적용 및 검증

3.1 비대칭 형상의 평면 밀링 가공

Fig. 11에서 본 연구에 적용된 윤곽의 형상은 convex한 포켓으로 Line-Line, Line-Arc, Arc-Line의 선분으로 구성된다. Line은 시작점과 끝점에 의해 표시되고, Arc는 시작점과 끝점 그리고 반경으로 표시되며, 사용된 공구경로 생성 시스템의 입력 데이터는 Table 1과 같다.

Table 1 Process data

Item	Value	Unit
Feedrate	200	mm/min
Spindle Speed	1500	rpm
Tool Diameter	5	mm
Cutter	Flat endmilling cutter	

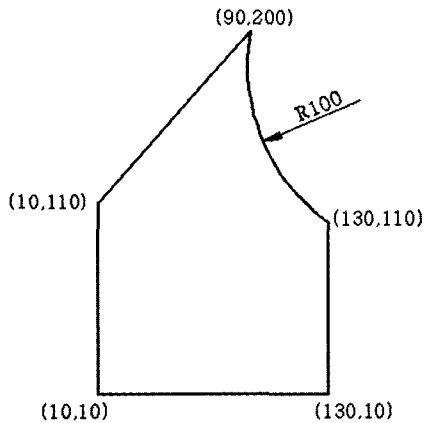


Fig. 11 Example profile of workpiece geometry

3.2 프로그램의 실행

프로그램을 실행한 결과 출력된 G-code 파일에서와 같이 각각의 좌표값과 Arc에 대한 공구반경 값의 동적변화를 확인할 수 있으며 G-code 파일의 내용은 다음과 같다.

```

N0 G70
N10 G94 F200.000000
N20 G96 S1500.000000
N30 G00 X68.227020 Y68.227020
N40 G01 X71.772972 Y68.227020
N50 G01 X71.772972 Y84.667664
N60 G02 X68.904709 Y87.953789 R158.227036
N70 G01 X68.227020 Y87.191383
.
.
.
N140 G01 X87.950394 Y52.049599
N360 G02 X79.498878 Y170.189560 R111.865540
N370 G01 X21.865536 Y105.352043
N380 G01 X21.865536 Y15.000000
N390 G01 X125.000000 Y15.000000
N400 G01 X125.000000 Y107.520065
N410 G02 X84.609192 Y186.351746 R105.000000
N420 G01 X15.000000 Y108.041405
N430 G01 X15.000000 Y15.000000
N440 M00
    
```

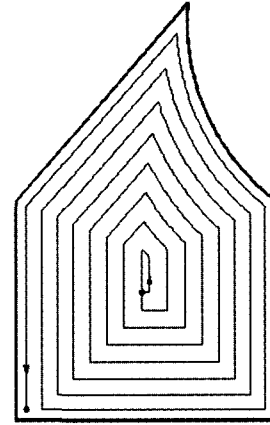


Fig. 12 Tool path pattern and sequence

본 연구에서 얻어낸 G-code 파일을 검증하기 위해 형상 모델링과 G-code를 입력하여 공구경로를 확인할 수 있는 패키지로서 시중에서 상품화되어 사용되고 있는 소프트웨어인 Go-clan V4를 이용하여 검증한 결과 출력된 G-code 파일에서와 같이 Fig. 12의 나선형 공구경로를 검증할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 임의의 2차원 convex 포켓 형상의 최적한 동적오프셋을 생성하기 위해 개발된 알고리즘을 이용하여 컴퓨터 언어로 프로그램화 한 후, 프로그램의 규칙에 따른 포켓의 형상 데이터를 입력하므로써 프로그램상에서 자동으로 공구경로를 생성하여 G-code 파일을 얻어냈다.

또한 이를 검증을 통하여 최적한 공구경로를 확인하므로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 포켓 경계윤곽의 최적한 동적오프셋을 계산하는 알고리즘을 이용하여 프로그램상에서 출력된 나선과 같은 공구경로를 생성하므로써 언더컷과 오버컷을 방지할 수 있도록 하였다.
- (2) 본 연구의 공구경로 생성방법은 최적한 동적오프셋을 적용하여 공구의 위치, 시작과 정지의 횟수를 줄여 주어진 포켓 평면에 대해 보다 원활한 공구의 조작성을 가능하도록 함으로써 불필요한 G-code를 제거하고 가공시간을 단축하여 원가절감과 생산성 향상을 기대할 수 있다.
- (3) 향후 연구과제로는 포켓의 형상이 concave하고 내부에

임의의 island를 가진 형상에 대해서도 동적오프셋 알고리즘을 적용하고, CAD상에서 정의된 형상 데이터를 곧바로 프로그램에 연결시킬 수 있는 방법의 개발이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Held, M., 1994, "Pocket Machining based on contour-parallel tool paths generated by means of proximity maps", Computer Aided Design Surrey, UK, Butterworth Heinemann Ltd, Vol. 26, No. 3, pp. 189~203.
- (2) K. K. George and N. Ramesh Babu, 1995, "On the Effective Tool Path Planning Algorithms for Sculptured Surface Manufacture", Computers ind. Engng., Vol. 28, No. 4, pp. 823~838.
- (3) Woodwark, J., 1986, Computing shape, Butterworths, Guildford, U.K.
- (4) Preiss, K., 1989, Automated mill pocketing computations, In Advanced Geometric Modeling for Engineering Applications, North Holland, Amsterdam, NL.
- (5) Persson, H., 1978, "NC machining of arbitrarily shaped pockets", Computer Aided Design, Vol. 10, No. 3.
- (6) Held, M., 1991, On the computational geometry of pocket machining, Spinger Verlag.
- (7) Kim, K., and Jeong, J., 1995, "Tool path generation for machining freeform pockets with island", Computer in Industrial Engineering, 28(2), pp. 399~407.
- (8) Harenbrook, D., 1980, "The connection of CAD and CAM by means of the program package PROREN/NC", Technical report, Ruhr University, Bochum, FRG.
- (9) Millan K Yeung and Desmond J Walton, 1994, "Curve fitting with arc splines for NC toolpath generation", Computer Aided Design, Vol. 26, No. 11, pp. 845~849.
- (10) Chaikwan Namkoong and I. Yellowley, 2001, "Contour machining error in NC milling process", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 10, No. 6, pp. 116~125.