

## 피스톤의 형상 모델링 및 CNC 가공 데이터 산출용 소프트웨어 개발

이철수<sup>1</sup> · 이재필<sup>1</sup> · 김성복<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 산업공학과 / <sup>2</sup>화천기공주

### The Development of the Software for the Geometry Modeling and Generating CNC Machining Data of a Piston

Cheol-Soo Lee · Je-Phil Lee · Seong-Bok Kim

A noncircular cutting such as a piston cutting has depended on the copy-machining because of its complex shape. But the copy-machining needs a master model and brings about a low quality of the piston caused by being worn out of the master model. And the lower cutting speed reduces the productivity. In this paper, for solving these problems, a specialized software system and its subsequent procedure are presented.

The shape of a piston consists of an oval, an offset, recesses, and eccentricities. The paper describes these shapes as a consistent equation that is a function of the rotational angle and the position of longitudinal direction(Z-axis). It is simple to define the characteristic geometry of a piston and to generate a tool path for CNC machining.

This paper proposes the a proper structure of a 4-axes CNC(Computerized Numerical Control) lathe for machining the piston. As well as X-axis and Z-axis, are attached to the machine a C-axis for rotation and a Y-axis for higher speedy prismatic motion parallel to X-axis.

#### 1. 서 론

숙련된 작업자에 의하여 수동으로 작업이 이루어지는 범용 선반의 가공은 대부분 진원 가공(Circular Cutting)만을 수행한다. CNC(Computerized Numerical Control) 선반에서도 비진원 가공(Noncircular Cutting)은 거의 수행하지 않는데, 비진원 가공은 현실적으로 사용용도가 광범위하지 못하기 때문이다. 그러나 자동차 엔진의 피스톤과 같이 비진원 가공을 요구하는 특별한 경우에는 범용 선반에서는 가공이 불가능하다. 따라서 CNC 선반에서만 작업이 이루어지는데, 이 경우에는 일반적인 CNC

의 기능 외에도 특별한 고기능이 요구된다.

자동차 엔진의 피스톤은 상온(약 20도)에서 가공되지만 엔진에 장착하여 시운전(Warming up)을 행한 후에는 엔진 속의 폭발열과 고온의 엔진 속에서 왕복운동을 반복하게 되므로 마찰열에 의하여 냉각수의 온도인 80 ~ 85도까지 오르게 되기 때문에 열팽창에 대한 변형이 생기게 된다. 이를 미리 예측하여 실제운전에서 이상 변형을 방지할 수 있도록 설계제작 단계에서 고려하여야 한다[1][2].

자동차 엔진의 피스톤과 같은 형상은 기계적 구조와 소프트웨어의 기술적인 문제로 인하여 예전부터 마스터 모델을 사

용하는 모방절삭가공이 주로 이용되었다. 모방절삭방식의 가공은 마스터 모델의 제작이 필요하며 장기간 사용 시에 마스터 모델의 마모로 인하여 품질저하가 발생할 수 있고 절삭속도의 제약으로 생산성의 저하를 가져온다.

본 논문에서는 모방절삭방식으로 인한 피스톤가공 시에 발생하는 문제점들을 해결하기 위하여 PC(Personal Computer)에서 피스톤형상을 모델링하고 NC 데이터를 산출하여 CNC 기계에서 가공하는 일련의 과정을 제안하고 있다. 특히 피스톤의 특징형상을 일관된 수식으로 정의하는 방법을 제시하고 이에 의하여 형상의 모델링과 NC 데이터의 산출시간을 단축할 수 있도록 하였다.

## 2. 연구의 내용

### 2.1 연구의 배경

선반에서 대부분의 절삭가공형태는 진원의 가공을 중요시하며 진원도는 그 기계자체의 정도를 표시하는 중요한 요소이기도 하다. 자동차 엔진의 피스톤과 같은 형상은 비진원이라는 특별한 형상을 가지고 있으므로 일반적인 선반(범용 선반, CNC 선반)에서는 쉽게 가공을 할 수가 없으며 특별한 기능이 필요한 가공형태이다.

자동차 엔진의 피스톤은 핀 구멍의 복잡한 형상과 2~4 사이클 엔진의 경우 실린더 쪽의 흡기 및 배기구의 위치에 따라 균일하지 않은 열이나 응력 등의 영향에 의한 변형을 고려하여 횡단면형상은 타원이고 종단면형상은 테이퍼나 선형의 프로파일을 갖는다. 이러한 비진원의 가공은 현재까지 정밀한 마스터 모델을 만들어 모방절삭가공을 하는 방법을 선택하였다.

모방절삭방식은 먼저 가공을 위하여 정밀한 마스터 모델을 만들어야 하는데, 피스톤 한 제품에 대한 개발기간이 길어지고 개발비용도 많이 소요된다. 또한 마스터 모델에 약간의 변

형을 주고 싶을 때에도 시행착오에 따르는 시간적, 경제적으로 많은 손실을 가져오게 된다. 정밀한 마스터 모델을 만들었다 하더라도 모방절삭가공을 함으로써 마스터 모델의 마모로 인한 피스톤품질의 저하가 생긴다. 모방절삭가공의 수행에 따른 문제점들은 CNC 제어방식을 사용하면 자연스럽게 해결된다.

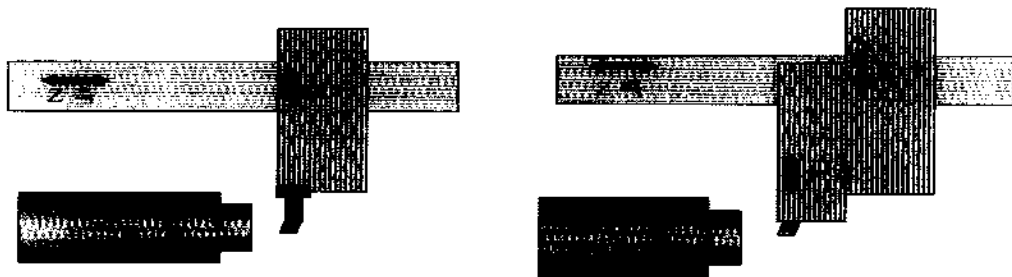
CNC 제어방식에는 피스톤을 모델링하는 소프트웨어가 탑재되어 있으므로 PC상에서 개발할 피스톤의 모델이 선정되면 곧바로 피스톤의 모델링과 함께 검증단계와 가공경로의 생성 단계를 거쳐 최종적으로 CNC의 제어를 위한 모션코드를 생성한다. 가공된 피스톤샘플을 보고 수정하고 싶을 때에도 단지 피스톤의 모델링 단계에서 간단한 형상재정의의 통하여 변경할 수 있다. 이와 같이 CNC 제어방식에서는 한 피스톤제품을 개발할 때에 모든 작업이 PC상에서 이루어지므로 개발기간의 단축, 개발비용의 절감은 물론 제품의 타원형상에 대한 수정 시에 형상재정의의 통하여 빠르고 간단하게 수정할 수 있다.

피스톤을 가공하기 위한 전 단계까지의 차이뿐만 아니라 모방절삭방식과 CNC 제어방식에서는 가공상에 있어서 큰 차이를 보인다. 모방절삭방식에서는 마스터 모델을 따라 가공하는 것이므로 추종성의 문제점 때문에 절삭속도의 향상에 제약을 준다. CNC 제어방식은 기계의 구조적인 성능에 따라 고속의 가공이 가능하여 모방절삭가공 시의 추종성의 한계를 극복할 수 있으므로 높은 생산성의 향상을 기대할 수 있다.

### 2.2 기계의 구조

CNC 제어방식을 사용하여 자동차 엔진 등에 들어가는 피스톤을 가공할 때에는 소프트웨어적인 기술뿐만 아니라 CNC 선반에 있어서 기계적인 구조가 갖추어져 있어야 한다.

<그림 1> (a)는 일반적인 CNC 선반의 개념적인 제어축의 관계를 표시하였는데 X, Z축과 한 개의 주축(Spindle)을 가지고 있다. 선삭가공(Turning)은 선반 척(Chuck)에 물려 회전하고 있



(a) 2축 CNC 선반의 구조

(b) 제안된 피스톤 가공 선반의 구조

그림 1. 선반의 구조.

는 피삭재에 대하여 공구대에 견고하게 장착된 공구가 한 회전당 일정한 속도로 움직이면서 공작물을 가공하여 원통형 또는 기하학적으로 좀더 복잡한 형상의 공작물을 만들게 된다 [3]. 스피들의 회전축과 직각방향에 위치하는 X축은 절삭가공을 행할 때 스피들의 1회전 동안에 일정한 기울기를 갖는 방향으로 이송되므로 피삭재는 원통형을 이루는 것이다.

피스톤과 같은 타원체를 가공하기 위해서는 주축의 1회전당 공구가 2회 이상의 왕복운동을 하여야 한다. 주축의 회전축과 직각방향인 X축이 왕복운동을 해야 하지만 일반적인 CNC 선반에서 X축은 추종오차가 크기 때문에 이를 해결하기 위하여 X축의 이송 베드면에 추종성이 뛰어나도록 새로운 축을 추가한다. 축의 이름을 결정하는 기준에 의하면 X축의 보조직선축은 U축이지만 CNC 선반에서 U축은 X축의 증분값의 의미이므로 사용할 수가 없어서 Y축을 사용한다. Y축의 가장 중요한 요소는 추종성을 높이는 것이므로 아주 가벼운 재질을 사용하여 장착하여야 하며 이송영역이 클 필요는 없다. 그리고 X축에 장착되어 있는 터렛을 없애고 Y축에 팁(Tip)의 장착을 위한 새로운 팁 장착기구가 필요하다.

Y축의 추가로 인하여 1회전당 2회 이상의 왕복운동을 하여 피스톤가공이 가능하지만 타원의 경우 정확한 위치에서 장축과 단축의 위치가 결정되어야 하며, 주축(또는 C축)의 1회전에 대해 이미 결정된 위치에서 Y축의 왕복운동이 수행되어야만 한다. 이를 위하여 주축으로 주로 쓰이는 인덕션 모터(Induction Motor)를 쓸 수도 있지만 본 논문에서는 서보 모터(Servo Motor)를 사용하여 C축을 부가하도록 한다. 인덕션 모터는 정확한 위치제어가 불가능하며, 인덕션 모터에 부가장치를 설치하여 위치제어가 가능할지라도 CNC 제어시스템에서 제어하고 있으므로 본 연구에서 사용하려고 하는 방법과는 맞지 않으므로 서보 모터를 사용한다. 서보 모터를 사용하는 C축과 Y축의 동기화(Synchronization)로 타원가공에 정확한 위치제어를 가능하도록 한다. <그림 1>-b)는 제안된 피스톤가공 전용 기계의 구조로 기존의 2축 CNC 선반에 X 이송축상에 Y축을 새로이 장착하고 주축을 서보 모터로 대체한 것이다.

### 2.3 비진원 가공에 대한 기존 연구

비진원 형상의 가공에 대한 연구는 그 용도가 다른 것에 비하여 그리 광범위하지 못하기 때문에 그리 많지 않다. 하지만 비진원 기어[4]와 자동차의 엔진 등에 들어가는 피스톤은 제품을 제작할 때에는 반드시 필요한 기술이다.

특히, 선반 가공에서의 비진원에 대한 연구는 미흡한 편이

며, 국외에서도 많이 이루어지지 않고 있다. 비진원 가공을 위한 시스템은 개발되었지만[5], 그 소프트웨어에 대한 내부 알고리즘은 전혀 알려지지 않고 있다. 국내에서는 비진원 가공을 위한 CNC 선반의 개발에 관한 연구[6]가 있었지만 비진원의 가공을 위하여 기존의 2축 선반의 기계적인 구조를 개선하고, 간단한 형상에 대하여 정의하는 연구만이 있었다.

본 논문에서는 비진원의 복잡한 형상을 가진 피스톤의 가공을 위하여 적절한 형상 모델링 방법을 제안하여 NC 코드를 고속으로 생성이 가능하도록 한다.

## 3. 형상 모델링과 공구경로의 생성

### 3.1 피스톤의 구조

<그림 2>는 피스톤 각 부분의 구조를 표현해 놓은 것이며, 피스톤은 피스톤 헤드부(Piston head), 링부(Ring section), 스커트부(Skirt section) 및 보스부(Boss) 등으로 구성되어 있다. 피스톤은 실린더내를 왕복운동하는데, 폭발행정에서 고온고압의 가스로부터 받은 압력에 의해 커넥팅 로드(Connecting rod)를 거쳐 크랭크축에 회전력을 주는 것이다. 피스톤 헤드는 2000도 이상의 연소가스에 노출되고, 40~60kg/cm<sup>2</sup>의 압력을 단시간에 충격적으로 받으며 실린더내를 고속으로 운동하기 때문에 실린더 벽과의 사이에 강한 마찰을 일으킨다[1]. <그림 3> (a)는 피스톤이 실린더 내를 고속으로 왕복운동을 할 때 피스톤이 받는 열의 분포를 표시한 것이다. 피스톤은 이와 같은 가혹한 조건에서 그 기능을 다하기 위해 여러 가지 조건들이 필요하지만 여기서는 선반에서 가공할 때의 형상에 관한 부분만 언급하기로 한다.

피스톤은 상온에서 실린더와 적당한 여유를 유지하도록 설계되어야 한다. 이를 피스톤 간극(Piston clearance)이라 하는데, 이 피스톤 간극의 크기에 따라 소결(燒結), 압축압력의 저하, 블로 바이(Blow by), 연소실에 오일이 올라오는 것 등의 문제가

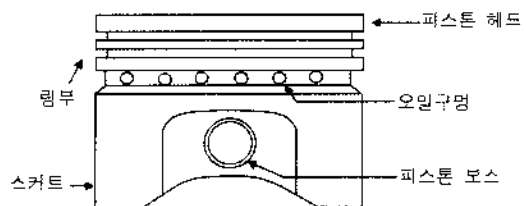


그림 2. 피스톤의 구조

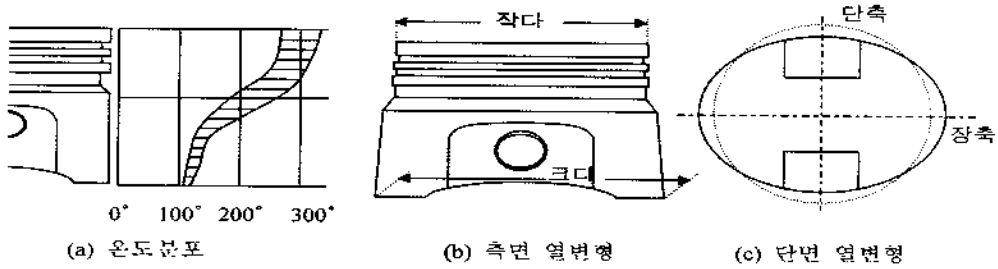


그림 3. 피스톤의 온도분포와 열변형의 대체.

발생할 수 있다. 이러한 문제점을 제거하고자 고온고압에 대한 변형을 미리 고려하여 피스톤을 설계해야 한다. <그림 3> (b)에서 볼 수 있는 것처럼 피스톤의 헤드부는 가열되어 팽창되는 정도가 크기 때문에 스커트부보다 작게 만든다. <그림 3> (c)에서처럼 피스톤의 보스부는 두껍게 되어 있어 작동 중 고열을 받으면 다른 부분보다 팽창이 크기 때문에 피스톤 보스방향의 지름이 그 직각방향의 지름보다 작게 만든다. 이처럼 피스톤은 엔진의 작동온도에서 일어날 수 있는 변형에 대하여 미리 고려하여야 하며, 실린더내에서 왕복운동 시에 마찰력을 최소화 하여 소음발생을 억제할 수 있도록 설계제작하여야 한다[1][7].

### 3.2 부위별 형상 모델링

피스톤의 부위는 여러 가지 특징을 가지고 있는데 이러한 특징을 고려하여 형상 모델링을 할 수 있다. 본 논문에서는 타원 형상(정타원, 2중타원, 3중타원, 3각타원), 오프셋(Offset) 형상, 홈(Recess)형상, 편심(Eccentricity)형상을 모델링 할 수 있도록 하였다[8][9].

#### 3.2.1 타원형상

<그림 3> (c)에서 볼 수 있듯이 피스톤의 보스부는 다른 부분보다 두껍게 되어 있어 열팽창이 크기 때문에 피스톤 편 방향을 단축으로, 그 직각방향을 장축으로 설계하므로 피스톤의 단면은 타원의 윤곽을 갖는 것이 일반적이다. 이때 장축의 직경과 단축의 직경의 차이는 대략 0.125~0.325mm이다[1].

피스톤형상을 설계할 때 여러 조건에 따라 정타원, 2중타원, 3중타원, 3각타원을 만들 수 있고 각각의 형상에 대하여 회전량을 지정할 수도 있다. 정타원은 피스톤의 형상 중 대부분을 차지하는 것으로 일반적인 타원의 모양을 가지고 있는 형상을 의미한다. 정타원의 형상은 타원의 방정식으로부터 간단하게 유도할 수 있다. <그림 4>는 정타원의 단면형상을 모델링하는 것을 나타낸 것이다.

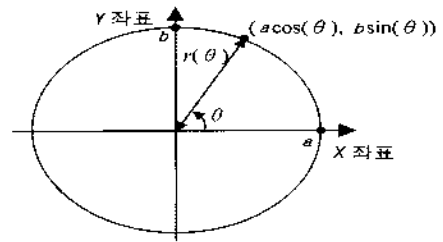


그림 4. 정타원의 단면 형상 모델링.

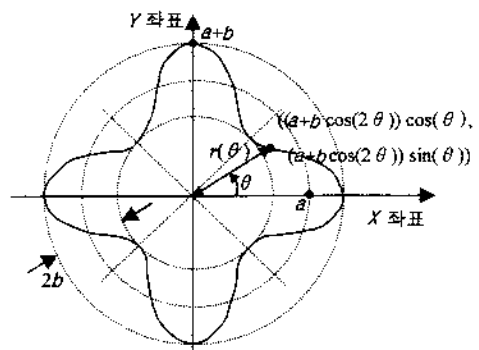


그림 5. 2중타원의 단면 형상 모델링.

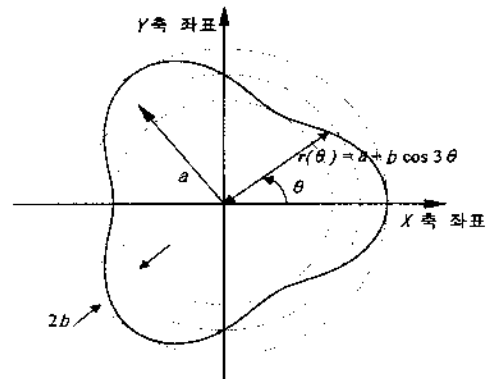


그림 6. 피스톤의 3각타원의 단면 형상 모델링.

<그림 4>는 장축을 X좌표로 단축을 Y좌표로 설정하고 각도  $\theta$ 를 파라미터로 하여 타원을 생성한 것이다. 타원을 생성하기 위한 매개변수식(Parametric Equation)은 식 (1)과 같으며,

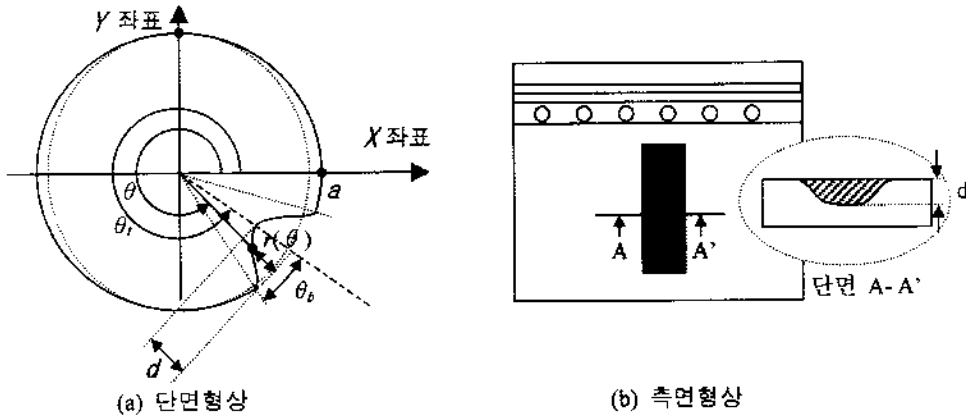


그림 8. 정타원의 단면 홈 형상 모델링.

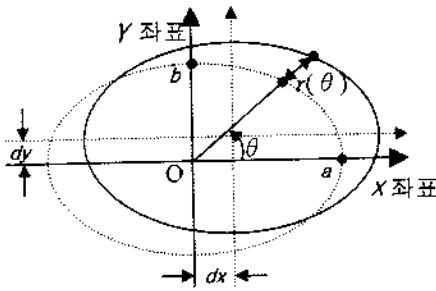


그림 7. 정타원의 단면 오프셋 형상 모델링.

이를 이용하여 원하는 타원을 만들 수 있다. 식 (1)을 이용하여 타원을 생성할 때 타원의 중심에서 타원상의 한점(x, y)까지의 거리는 식 (2)로 구할 수 있다.

$$x = a \cos(\theta) \tag{1}$$

$$y = b \sin(\theta)$$

$$r_{\text{ellip}}(\theta) = \sqrt{a^2 \cos^2(\theta) + b^2 \sin^2(\theta)} \tag{2}$$

단,  $r_{\text{ellip}}$  : 타원중심에서 타원상의 한점까지의 거리,

$a$  : 장축반경,

$b$  : 단축반경,

$\theta$  : 매개변수 ( $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ).

2중타원은 타원의 형상을 파라미터  $\theta$ 의 모든 구간에서  $\theta$ 의 값을 2배 하여 Sine 곡선과 Cosine 곡선의 주기를 각각 1/2배로 보간한 것으로 피스톤의 2중타원 단면형상은 <그림 5>와 같이 모델링할 수 있다. 식 (3)은 2중타원을 보간하는 식을 표현한 것이며, 식 (4)는 2중타원의 중심에서 타원상의 한점(x, y)까지의 거리를 나타낸 식이다.

$$x = (a + b \cos(2\theta)) \cos(\theta) \tag{3}$$

$$y = (a + b \sin(2\theta)) \sin(\theta)$$

$$r_{\text{ellip}2}(\theta) = a + b \cos(2\theta) \tag{4}$$

단,  $r_{\text{ellip}2}$  : 타원중심에서 타원상의 한점까지의 거리,

$a$  : 기준원의 반지름

$b$  : 변동량

3중타원의 경우도 2중타원의 경우와 마찬가지로 정타원에 비하여  $\theta$ 의 값을 4배 함으로써 Sine 곡선과 Cosine 곡선의 주기를 각각 1/4배로 하는 것 외에는 차이가 없다. 따라서 3중타원에 대한 설명은 2중타원의 경우와 동일하므로 생략하기로 하며 3중타원을 구하는 식과 타원의 중심에서 타원상의 한점(x,

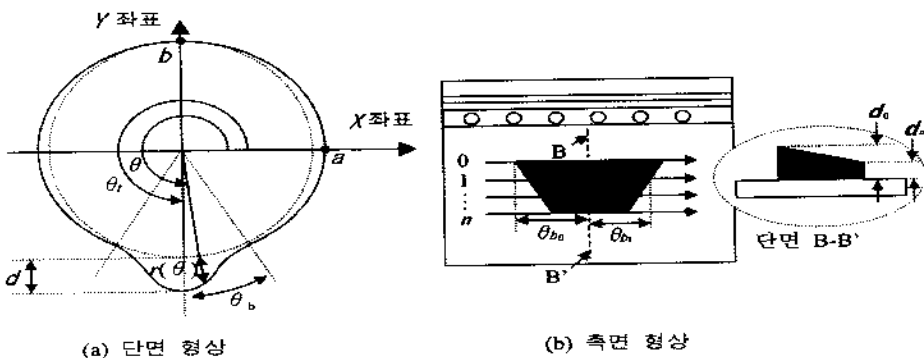


그림 9. 정타원의 편심모양 모델링.

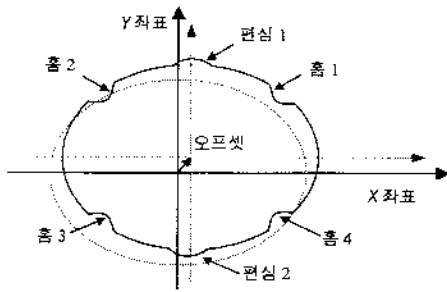


그림 10. 피스톤의 복합 단면 형상.

y)까지 거리는 각각 식 (5), (6)과 같다.

$$\begin{aligned} x &= (a + b \cos(4\theta)) \cos(\theta) \\ y &= (a + b \cos(4\theta)) \sin(\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

$$r_{\text{ellip3}}(\theta) = a + b \cos(4\theta) \quad (6)$$

단,  $r_{\text{ellip3}}$  : 타원중심에서 타원상의 한점까지의 거리

3각타원의 형상은 극히 드문 형상으로 <그림 6>과 같이 피스톤이 삼각형의 형상을 가지고 있다. 3각타원은 극좌표 (Polar Coordinate)를 이용하여 유용한 곡선을 만든 것으로 극좌표의 반지름은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{\text{ellip3}}(\theta) = a + b \cos(3\theta) \quad (7)$$

단,  $r_{\text{ellip3}}$  : 타원중심에서 타원상의 한점까지의 거리

### 3.2.2 오프셋(Offset) 형상

오프셋 형상은 피스톤을 설계할 때에 연소실의 폭발 시에 대비하여 피스톤의 위쪽부분을 폭발부분 쪽으로 미세한 형상의 이동을 갖도록 하는 것이다. 이것은 피스톤의 실린더내부에서 폭발이 일어날 때 충격과 폭발열에 의하여 피스톤의 상단부가 반대방향으로 밀려가는 것을 보정하기 위함이다.

$$V = O + (\cos \theta, (T - b) \sin \theta) \quad (8)$$

단,  $V$  : 오프셋된 타원의 자취,

$O$  : 회전 중심점,

$T > 0$  인 상수.

$$r_{\text{offset}}(\theta) = T_m(\theta) - T_o(\theta) \quad (9)$$

단,  $r_{\text{offset}}$  : 타원중심에서 타원상의 한점까지의 거리

$T_m$  : 오프셋된 타원과 식 (8)의 교점에서의  $T$  값,

$T_o$  : 오프셋전 타원과 식 (8)의 교점에서의  $T$  값.

<그림 7>은 오프셋된 타원형상을 보여주고 있다. 오프셋

은 단지 타원을 지정된 방향으로 이동한 것이라고 볼 수 있지만, 중심  $O$ 를 축으로 하여 회전하기 때문에 식 (8)과 같이  $\theta$ 에 대한 식으로 타원의 자취를 근사화 할 수 있다. 또, 타원의 정의는 두 정점에서 거리의 합이 일정한 값( $2 \times$ 장축길이)을 갖는 점의 자취이므로 두 타원의 자취식을 가지고 타원상의 한 정점에서의 회전 중심축에서의 거리를 각각 구하여 그 차로  $r(\theta)$ 를 구하면 식 (9)와 같다.

### 3.2.3 홈(Recess)형상

홈 형상은 피스톤을 실린더 안에서 왕복운동을 할 때 실린더 조립하기 위하여 발생하는 실린더의 돌출된 부분을 피스톤 형상에 고려하기 위한 것이다. <그림 8>은 실린더의 모습과 실린더의 돌출된 부분을 고려하기 위하여 홈형상을 갖는 피스톤의 형상을 나타낸 것이다. <그림 8> (b)에 나타난 것처럼 홈 폭과 홈 깊이가 모든 구간(피스톤단면과 수직방향)에서 일정하다. 이를 식으로 나타내면 식 (10)과 같은데, 홈형상만을 나타내는 상대적인 값이다. 하나의 피스톤에 홈은 여러 개가 존재할 수 있다.

$$r_{\text{recess}}(\theta) = -\frac{d}{2} \cos((\theta_i - \theta)/2\theta_b \times 2\pi) - \frac{d}{2} \quad (10)$$

단,  $r_{\text{recess}}$  : 타원중심에서 타원상의 한점까지의 거리,

$d$  : 홈 깊이,

$\theta_i$  : 홈 기준각도,

$\theta_b$  : 홈 폭 각도  $\div 2$ ,

$\theta$  : 매개변수 ( $\theta_i - \theta_b \leq \theta \leq \theta_i + \theta_b$ ).

### 3.2.4 편심(Eccentricity)형상

피스톤이 실린더를 고속으로 왕복운동을 할 때 피스톤과 실린더의 벽이 마찰하는 부분이 많아지면 엔진의 소음이 커지게 된다. 편심형상은 피스톤의 보스부를 실린더와 닿는 부분을 줄여서 엔진의 소음을 줄이고 효율을 더 높이도록 한 것이다. <그림 9> (a)는 편심형상의 단면모습을 <그림 9> (b)는 측면모습을 나타낸 것이다.

편심형상은 홈형상과 비교하여 볼 때, 피스톤의 측면방향의 지정된 구간에서 단면을 나눈다고 할 때 편심형상의 시작점과 끝점, 그리고 편심량이 같지 않을 수 있다. 임의의 위치  $\kappa(\theta)$ 를 구하면 식 (11)과 같으며, 편심형상만을 표현한 상대적인 값이다. 높이값에 대한 것은 중간의 값을 직선보간으로 간단히 구할 수 있다. 편심형상은 복수 개가 존재할 수 있다.

$$r_{\text{eccen}}(\theta) = \frac{d}{2} \cos((\theta_i - \theta)/2\theta_b \times 2\pi) + \frac{d}{2} \quad (11)$$

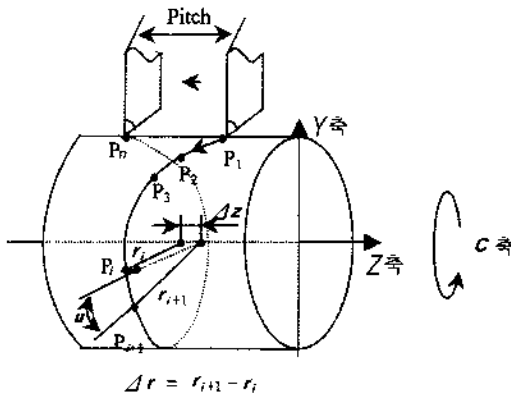


그림 11. 타원통 가공을 위한 공구경로.

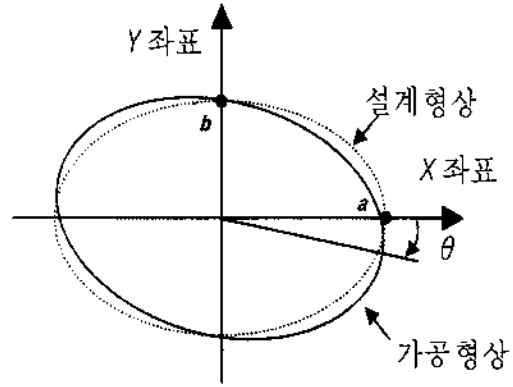


그림 12. 정타원 가공에서의 추종오차.

- 단,  $r_{eccen}$  : 타원중심에서 타원상의 한점까지의 거리,
- $d$  : 편심 깊이,
- $\theta_t$  : 편심 기준각도,
- $\theta_b$  : 편심 폭 각도 ÷ 2,
- $\theta$  : 매개변수(  $\theta_t - \theta_b \leq \theta \leq \theta_t + \theta_b$  )

3.3 피스톤의 형상 모델링

<그림 10>과 같은 형상의 피스톤을 모델링할 때, 앞에서 구한 식들을 정리하여 정타원(식 (2))인 경우에 오프셋(식 (9)), 홈(식 (10)), 편심(식 (11))등을 표시하면  $\kappa(\theta)$ 는 식 (12)와 같다.

$$\kappa(\theta) = r_{clip}(\theta) + r_{offset}(\theta) + \sum_{i=0}^{홈개수} r_{recess}(i, \theta) + \sum_{i=0}^{편심개수} r_{essen}(i, \theta) \quad (12)$$

만일 기본형상이 정타원이 아닌 2중타원, 3중타원, 3각타원인 경우에는  $r_{clip}(\theta)$ 대신에  $r_{clip2}(\theta)$ ,  $r_{clip3}(\theta)$ ,  $r_{polar3}(\theta)$  등으로 대치할 수 있다.

피스톤의 각 부위를 모델링하는 것을 통하여 피스톤의 각각의 단면에 대한 모든 정의가 끝나면 각 단면들을 연결하여 전체 피스톤의 형상을 결정짓는다. 봉재의 형상을 가공할 때에는 단면으로 주어진 형상들의 Z축의 위치값과 가공할 때에 보간하는 z값이 일치하지 않으므로 단면과 단면을 선형보간하여 새로운 타원을 생성한다.

타원형상을 예로 들면, 각 단면형상의 Z축 위치값인  $z_p$ 점들이 있을 때  $\kappa(\theta, z)$ 는 앞에서 살펴본 것처럼  $\theta$ 값에 따라 타원형상을 이루고, z값의 변화에 따라 타원의 장축과 단축의 거리가 바뀔 수 있으므로 보간된 z값에 인접한 두 단면의 Z축 위치

값인  $z_{p1}, z_{p2}$ 점을 이용하여 선형보간으로 새로운 타원의 장축과 단축을 구한다. 그리고 새로 구한 타원의 장축과 단축을  $\theta$ 만큼 회전시켜  $\kappa(\theta, z)$ 를 구한다.

오프셋 형상의 경우도 타원을 단면에 대하여 이동한 것이기 때문에 최종적으로  $\kappa(\theta, z)$ 를 구하는 식만 다를 뿐 타원형상을 구하는 경우와 같다. 홈, 편심형상의 경우에도  $\kappa(\theta, z)$ 는  $\theta$ 에 대하여 구하는 것만 다를 뿐 주어진  $z_p$ 들에 대하여 선형보간을 하는 것은 타원형상과 동일하다.

3.4 공구경로의 생성

3.4.1 공구경로 생성의 적용

피스톤의 가공형상에 형상모델링이 완료되면 이를 바탕으로 전체적인 가공경로를 생성하게 된다. 피스톤의 수평단면만 고려한다면 C축과 Y축의 동기제어만으로 가능하지만 봉재를 가공하기 위해서는 Z축까지 포함하여 3축의 동기제어가 필요하다.

이러한 타원형상을 갖는 봉재를 가공하는 것은 앞에서 언급한 알고리즘으로 구현할 수 있는데, <그림 11>은 제한된 알고리즘을 적용한 프로그램과 타원통을 가공할 때 나타나는 가공경로를 나타내고 있다.

```
#define M_PI 3.141592
#define V_PITCH 1.5
void SS_calc_oval_cylinder()
{
double theta, ust, ued, ustep;
double x, y, z, c;
```

```

ust = 0.;
ued = 2.*M_PI;
ustep = M_PI / 18.; // 10도 간격으로 분할
c = 0.;
for ( theta = ust; theta <= ued; theta += ustep ) {
    z = V_PITCH * theta / (2 * M_PI);
    x = base_r;
// base_r은 x축의 이송량으로,
// 실린더의 장축과 단축반경 사이에서
// 랜덤하게 결정하지만 하나의 실린더 가공에서는 고정된다.
    y = r(theta, z) - x;

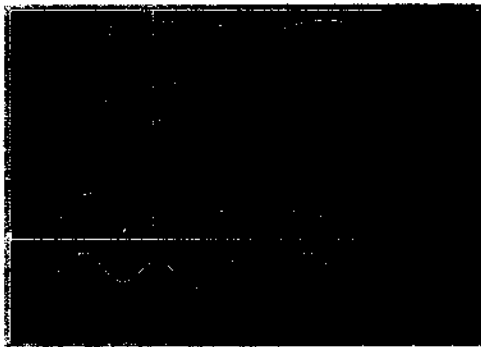
```

```

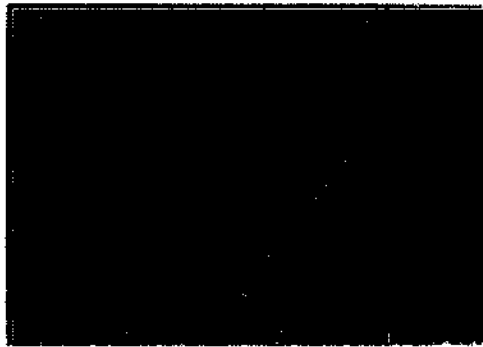
// 주어진  $\theta, z$  값을 식 (2), (9), (10), (11)과
// z값에 대한 보간된 타원을 생성하는 것(3.3절)에
// 적용하여  $r(\theta, z)$ 를 구한다.
        c = theta * 180. / M_PI;
// 계산된 x, y, z, c로 가공경로를 생성하여 저장한다.
    }
}

```

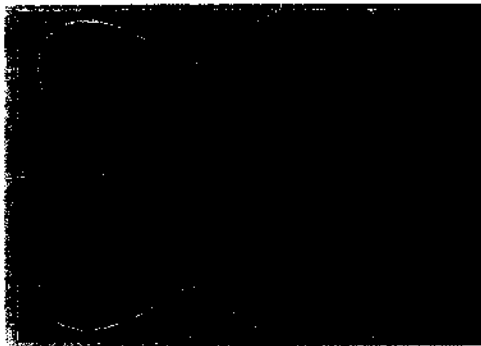
<그림 11>의 프로그램은 파라미터로 타원통의 타원 장축 반경, 단축반경들을 입력으로 하여 결정된 분할 해상도에 따라 공구경로를 생성한다. 타원통의 가공된 길이가 30mm라고



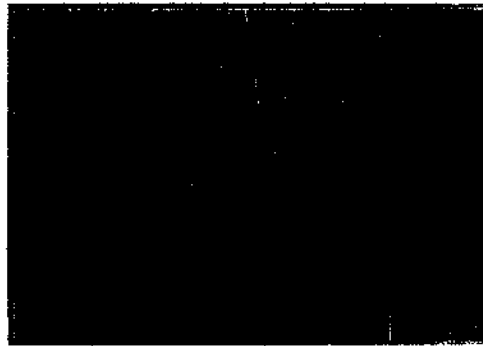
(a) 설계형상의 검증 화면



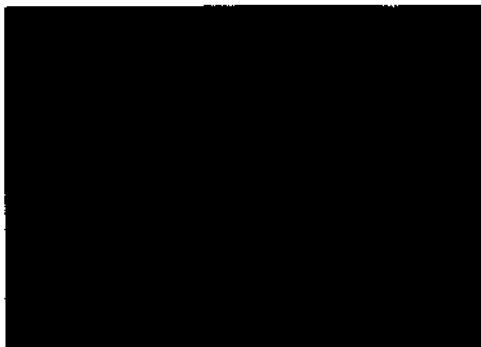
(b) 측면 프로파일



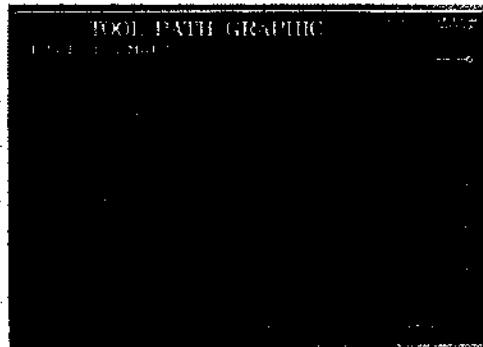
(c) 단면 형상



(d) 타원 중심까지의 거리



(e) 3 차원 형상



(f) 생성된 공구경로

그림 13. 개발된 피스톤가공 전용소프트웨어 화면의 예.



가정하고, 타원통의 높이 1.5mm마다 36등분하여 공구경로를 생성한다면 C축의 20회전으로 전체가공이 완료된다.

계산된  $x, y, z, c$ 값으로 공구경로를 생성할 때 고속으로 이송되는 Y축 이송영역을 평활화하기 위하여 X축의 고정되는 설정값을 허용범위 안에서 임의로 값을 결정하여 공구경로를 생성할 때 고려한다.

#### 3.4.2 추종오차에 대한 보정

생성된 공구경로를 CNC의 리모트 버퍼에 지령하더라도 지령된 축의 위치와 실제기계가 이송되는 것에는 차이가 발생하여 가공오차가 생기게 된다. 예를 들면, 정타원을 가공할 때 피스톤 핀 직각방향의 한 쪽을  $0^\circ$ 로 정의하고 반대쪽을  $180^\circ$ 로 하여 가공을 하게 되면 실제가공에서는 <그림 12>에서와 같이 가공이 원하는 것과는 약간의 각도오차를 가지고 나타난다. 이와 같이 틀어진 오차를 진원 측정기로 측정하여가공형상을 입력할 때에 이에 대한 비틀림 각도( $\theta$ )를 입력하여 보정함으로써 이 문제를 해결할 수 있다. 실험적으로 비틀림 각도는 회전속도와 정비례의 관계를 갖고 있으므로 손쉽게 추정할 수 있다.

## 4. 적용사례

### 4.1 소프트웨어 개발

소프트웨어는 크게 네 부분으로 나누어져 있는데, ㉠ 피스톤의 가공형상을 정의하기 위한 형상정의모듈, ㉡ 정의된 형상과 가공경로를 확인할 수 있는 형상확인모듈, ㉢ 실제가공을 수행하기 위한 NC 데이터와 모션코드의 생성모듈, ㉣ 생성된 NC 코드의 확인모듈, ㉤ CNC 컨트롤러에 모션코드를 고속

전송하기 위한 전송모듈이다.

개발된 피스톤가공 전용소프트웨어와 기계의 제작은 모방 절삭가공으로 수행되던 모든 작업을 PC 상에서 처리하도록 하였다. 피스톤가공형상을 정의하는 모듈을 통하여 피스톤의 형상을 간편하게 정의하고, 정의된 형상의 단면, 측면, 반지름의 크기와 입력된 형상을 가공하기 위한 공구경로를 그래픽을 통하여 확인할 수 있다. 따라서 작업자는 정의된 피스톤의 형상을 그래픽을 통하여 가공될 피스톤의 형상을 파악할 수 있으며, 형상입력의 오류를 방지할 수 있다.

<그림 13>은 개발된 소프트웨어의 화면이다. <그림 13>(a)는 입력된 형상을 동시에 여러 가지 형태의 그래프 뷰(View)로 표시하여 확인한 것이고, <그림 13>(b), (c), (d)는 각 뷰 별로 자세히 볼 수 있도록 한 화면이다. <그림 13>(e)는 회전방향을 하나의 직선 축으로 하여 펼친 그림의 형태로 그려서 확인할 수 있도록 한 것이다.

<그림 13>(f)는 가공경로를 표시한 것이며, 가로축은 Z축, 세로축은 X축의 이동궤적이다.

### 4.2 피스톤 가공용 CNC 선반

<그림 14>는 기계의 각 부분의 구조를 나타낸 것이다. ㉠는 피스톤을 가공하는 영역이며, ㉡는 CNC 조작반으로 피스톤을 가공하기 위한 수동이송과 가공물의 세팅작업에 이용한다. ㉢는 PC와 CNC 선반을 연결하여 고속으로 가공데이터를 전송할 수 있는 RS-422 통신라인이다. ㉣는 개발한 피스톤가공 전용 소프트웨어가 탑재되어 있는 PC 시스템이다.

<그림 15>(a)는 피스톤가공을 위하여 개발된 CNC 선반의 제어축의 구조를 나타낸 것이다. 개발된 피스톤가공 전용 CNC 선반은 정확한 회전과 다른 축과의 동기화를 위하여 기

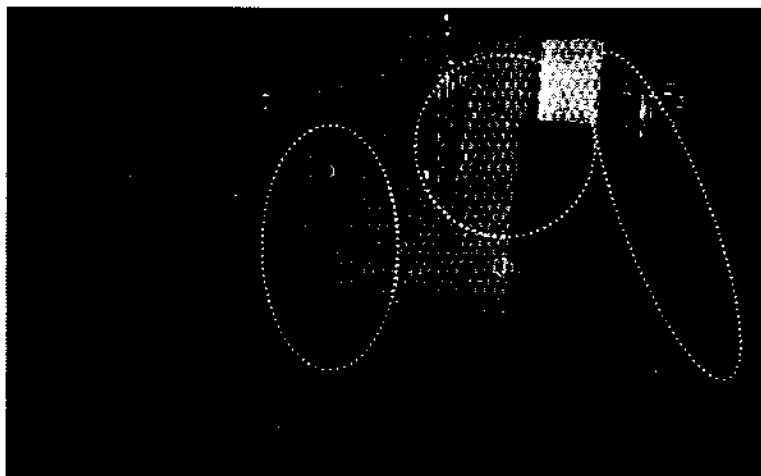


그림 14. 개발된 피스톤 전용 CNC 선반의 모습.

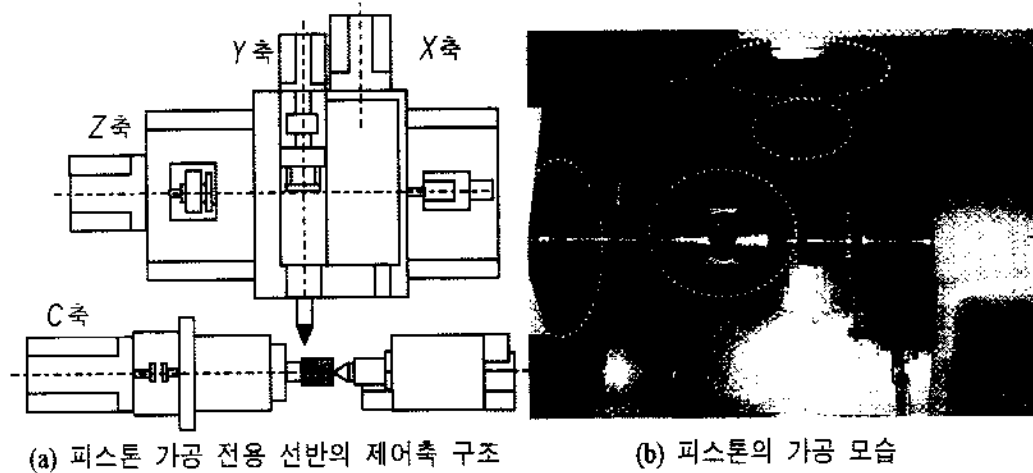


그림 15. 피스톤 가공 전용 선반의 모습.

존의 스피들 모터(인덕션 모터)를 사용하지 않고 서보 모터를 사용하였다. 또한 고속가공을 위한 Y축을 추가로 장착하였다. 고속가공을 위한 이송블록의 전송에는 리모트 버퍼(Remote Buffer)를 사용하였다[10]. <그림 15>(b)는 피스톤을 가공하는 모습을 보여주고 있는데, ㉓는 X축 위에 장착된 Y축이며, ㉔는 가공 팁으로 Y축 위에 있다. ㉕는 가공할 피스톤으로 지그에 의해 ㉖ C축에 장착되어 있다.

<그림 16>은 본 논문에서 제안된 방법으로 가공한 피스톤의 모습이다. 오일 링 홈과 크랭크 샤프트와 연결되는 피스톤 핀 홈은 별도의 기계에서 미리 가공되었고 원통부분 전체는 본 논문에서 제안된 식으로 가공되었다.



그림 16. 가공된 피스톤의 모습.

### 5. 결 론

본 논문에서는 피스톤형상을 CNC 가공에 적합한 형태로 표현할 수 있는 수식을 개발하였다. 기본형상의 수식은 타원형상

(정타원, 2중타원, 3중타원, 3각타원), 오프셋(Offset)형상, 홈(Recess)형상, 편심(Eccentricity)형상인데, 이들을 일관된 형태(주축의 회전각도와 z값에 대한 함수)로 표현하였다. 이와 같은 방법으로 계산함으로써 NC 코드의 생성에 있어서 고속의 처리가 가능하며 피스톤을 가공할 때 나타날 수 있는 비틀림 현상을 손쉽게 보정할 수 있었다.

본 논문에서 제안된 피스톤 가공전용시스템은 실제산업 현장에서 사용 중이며, 피스톤의 납기단축 및 가공정밀도 향상에 이바지하고 있다.

### 참고문헌

1. 현영창, *가솔린 엔진* 집문당, pp. 58-63, 1992.
2. 임병오, *가솔린 기관* 보성각, pp. 48-54, 1997.
3. 양민양, *절삭가공—이론과 실제* 청문각, pp. 15, 1997.
4. 최상훈, "비원형기어에서의 압력각과 잇수비 및 곡률 반경의 적정범위에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제 14권, 제 6호, pp. 52-63, 1997.
5. 三宅秀彦, "CNC 피스톤 가공기 TPS-3000과 가공용 프로그램 데이터 작성 시스템," *기계기술*, pp. 42-46, 1992.
6. 김경석, 김종관, 김성식, "비진원 가공용 CNC 선반 개발에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제13권, 제4호, pp. 152-162, 1996.
7. 김영호, 배원병, 김재철, 김형식, "알루미늄 단조 피스톤의 개발에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제14권, 제9호, pp. 30-36, 1997.
8. 이철수, *CAD/CAM*, 터보테크출판부, pp. 51-78, 1997.
9. Rogers, D. F. and Adams, J. A., *Mathematical Elements for Computer Graphics*, McGraw-Hill International Editions, 1989.
10. FANUC, *FANUC Series 0 Descriptions*, FANUC, pp. 40-41, 1989.

**이철수**

한양대학교 산업공학과를 졸업하고 한국과학기술원 산업공학과에서 석사와 박사학위를 받았다.

현재: 전남대학교 산업공학과 부교수

관심분야: CAD/CAM, CNC 컨트롤러

**김성복**

산업대학원을 졸업하였다.

현재: (주)화천기공 생산기술부

관심분야: 기계구조의 해석의 관한 분야

**이재필**

전남대학교 산업공학과에서 학사과정과 석사과정을 마쳤다.

현재: 전남대학교 산업공학과 박사과정

관심분야: CAD/CAM과 CNC 분야