

# 실린더 라이너 오일그루브 가공 로봇 시스템 개발

노태양<sup>†</sup> · 이윤식\* · 정창욱\* · 이지형\* · 오용출\*\*

## Development of a grinding robot system for the oil groove of the engine cylinder liner

Tae-yang Noh, Yun-sik Lee, Chang-wook Jung, Ji-hyung Lee and Yong-chul Oh

**Key Words :** cylinder liner, grinding, laser sensor, oil groove, robot, vision

### Abstract

An engine for marine propulsion and power generation consists of several cylinder liner-piston sets. And the oil groove is on the cylinder liner inside wall for the lubrication between a piston and cylinder. The machining process of oil groove has been carried by manual work so far, because of the diversity of the shape. Recently, we developed an automatic grinding robot system for oil groove machining of engine cylinder liners. It can covers various types of oil grooves and adjust its position by itself. The grinding robot system consists of a robot, a machining tool head, sensors and a control system. The robot automatically recognizes the cylinder liner's inside configuration by using a laser displacement sensor and a vision sensor after the cylinder liner is placed on a set-up equipment.

### 기호설명

TCP : Tool Center Point

## 1. 서 론

대형 선박 및 발전에 사용되는 대형 엔진에는 실린더와 피스톤의 마찰의 영향을 줄이기 위해 실린더 라이너 내벽에 윤활을 위한 오일그루브가 존재한다. 선박용 엔진의 경우 선박의 크기와 종류에 따라 사용되는 실린더의 타입이 다양하고, 각각의 실린더의 타입에 따라 내부에 가공되는 오일그루브의 형상도 다양하다. 이러한 이유로 대부분 수작업에 의존하고 있는 오일그루브 가공 작업을 자동화 할 수 있는 가공 로봇 시스템을 개발 하였다. 구성은 Fig. 1 과 같이 부재 세팅 장치와 산업용 로봇으로 이뤄졌으며, 크레인에

의해 실린더 라이너가 부재 세팅장치에 올려지면 로봇이 실린더 내부로 팔을 뻗어 내부 기준 궤적을 인식하고 궤적을 생성 및 보정한 후 원주 방향의 오일 그루브를 가공한다. 실린더 라이너의 내면에는 오일의 유입을 위한 다수개의 홀이 존재하고 오일그루브는 이러한 홀을 기준으로 가공된다. 홀의 인식을 위해 카메라를 이용한 비전 센서가 사용되었으며, 로봇의 위치 및 자세 보정을 위해 레이저 변위 센서가 사용되었다.

## 2. 오일그루브 가공 로봇 시스템

### 2.1 로봇 시스템

본 연구에 적용된 로봇은 현대중공업(주)에서 제작된 HX300 형으로 300kg 의 가반중량과 실린더 라이너 오일그루브 가공을 위한 동작 영역에 원활히 대응할 수 있는 작업영역을 가지고 있다. 작업영역은 높이 방향으로 2,900mm, 반경 방향으로 3,800mm 이며, 서보모터에 의해 구동된다. 로봇의 자중은 약 2,000kg 이다. 실린더

<sup>†</sup> 현대중공업 자동화연구실  
E-mail : mechanics2@hanmail.net  
TEL : (052)203-9964 FAX : (052)250-9587

\* 현대중공업 자동화연구실

\*\* 현대중공업 엔진생산기술부

라이너 가공 로봇 시스템의 전체 구성을 Fig. 1 에 나타내었다.



Fig. 1 Oil groove grinding robot system

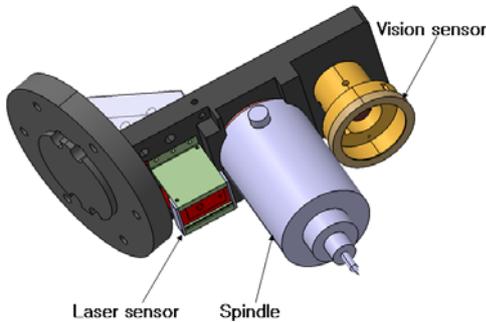


Fig. 2 Tool and sensors arrangement

## 2.2 가동 헤드 및 센서 배치

가공을 위해 최대 1.3Nm 의 토크와 최대 회전수 24,000rpm 의 고주파 스피들을 사용하였으며, 실린더 내면으로부터의 높이를 측정하기 위해 레이저 변위센서를 사용하였다. 또한 실린더 내면의 윤활유 유입을 위한 홀을 인식할 수 있도록 카메라를 이용한 비전 센서를 적용하였다. 스피들과 센서의 배치는 Fig. 2 와 같이 일직선 상에 배치하였다.

## 2.3 부재 세팅 장치

부재 세팅 장치는 Fig. 3 과 같이 구성되며, 실린더 라이너의 위치를 조정할 수 있도록 3 축의 볼 스크류와 위치제어 유닛을 구성하였다. 2 개의 V 블록은 상하 방향으로 높이 조정이 가능하며, 후방의 V 블록은 전후 방향으로 위치 조정이 가능하다. 독립된 3 축의 위치 오차는 0.1mm, 기준 위치는 도면정보를 이용한다. 로봇의 바닥에는 전후 방향으로 로봇을 이동시킬 수 있도록 공압 실린더를 이용한 슬라이드 장치를 구성하였다. 슬라이드 장치는 가공 시 로봇이 충분한 접근성을 확보할 수 있도록 전후진 이동이

가능하도록 구성하였다. 가공 시는 전진 상태에서 실린더 라이너 내부로 충분히 이동할 수 있도록 하였으며 공구 교체, TCP 점검 등을 위하여 점검위치로 이동할 경우에는 후진하여 로봇과 실린더 라이너와의 간섭 및 충돌을 피하도록 하였다.

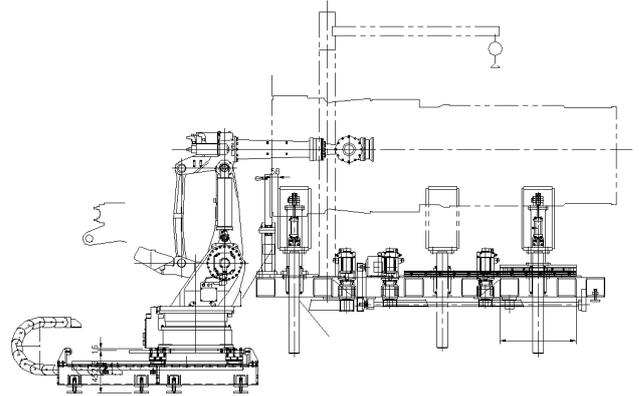


Fig. 3 Mechanical layout of the system

## 2.4 제어 시스템

### 2.4.1 제어 시스템 구성

전체 제어시스템 구성은 Fig. 4 와 같이 메인 제어기인 PLC 가 전체 시퀀스를 담당한다. PLC 에는 부재 세팅 장치의 V 블록의 위치 제어 유닛과 전후 방향 위치 제어 유닛이 연결되고, 스피들 모터는 RS422 통신을 이용하여 연결되었다. 또한 비전 센서와 레이저 변위 센서는 각각 RS232 통신으로 연결되었다. 메인 PLC 와 별도로 로봇 제어가 구성되며, 가공을 위한 데이터 처리 및 가공 궤적 생성은 로봇 제어기에서 담당한다. 로봇과 메인 PLC 는 CC-Link 로 연결되며, 조작은 터치스크린을 통하여 정보를 입력 받을 수 있도록 구성하였다.

### 2.4.2 가공 순서 흐름도

가공 순서의 흐름은 Fig. 5 와 같이 나타낼 수 있다. 로봇이 지정된 위치와 자세를 취한 상태에서만 작업이 시작된다. 부재 세팅 장치가 해당 실린더 라이너의 형상에 맞도록 위치를 조정하게 되고, 실린더 라이너가 장치 위로 올려지게 된다. 궤적 생성 및 가공 단계는 크게 6 개의 단계로 구성이 되며 형상인식과 궤적 생성 그리고 가공의 절차를 따른다. 각각의 단계에 대한 세부적인 사항은 3 장에 기술하였다.

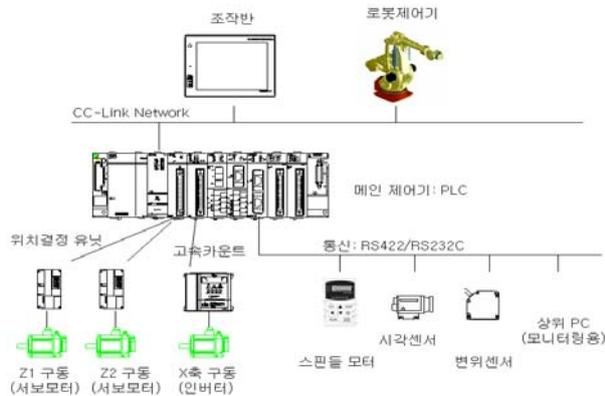


Fig. 4 Control units composition of the system



Fig. 5 Overall sequence of the system

### 3. 케직 생성 및 가공 프로그래밍

케직 생성 및 가공을 위한 프로그램은 본 연구에서 적용된 로봇의 언어인 HR-BASIC 을 이용하여 작성되었다. 로봇 프로그램의 구성은 크게 가공 프로그램과 특수 용도 프로그램으로 나눌 수 있다. 가공 프로그램은 중심축 찾기, 기준홀 탐색, 자동 탐색, 원주 가공, 홀 주위 가공으로 구성되었으며, 특수 용도 프로그램으로는 로봇 원위치 복귀, TCP 체크, 툴 교체 등이 포함된다.

#### 3.1 오일그루브 형상 및 가공 조건

오일그루브의 형상은 Fig. 6 과 같으며, 두가지의 형상을 가진다. 즉, 홀 주위의 짧은 구간에서의 형상(단면 B-B)과 원주 방향의 형상(단면 A-A)으로 나뉜다. 단면 A-A(원주 가공)의 경우는 깊이 2.0~2.5mm 의 절삭 깊이를 가지며, 단면

B-B(홀 주위 가공)의 경우는 최대 10mm 까지의 깊이를 가진다. 오일그루브의 형상은 2 가지 형상의 조합으로 다양하게 존재하며, 로봇은 이를 반영하여 가공 케직을 생성하였다.

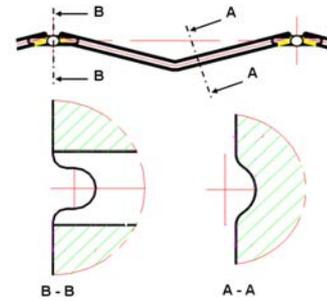


Fig. 6 Configuration of an oil groove

가공 및 절삭은 스피들의 회전수, 이송속도, 절입 깊이에 대한 절삭 테스트를 수행한 후 본 가공에 적합한 조건을 적용하였다. 1 회 절입 깊이에 대해서 반복 적용하여 최종 가공 깊이를 조절하였으며, 가공 케직에 대한 툴의 절삭 각도는 특정 구간에서 푸쉬 또는 드래그 각도를 조절하여 가공 시 발생하는 진동을 줄였다. 상용으로 출시된 7 개 사(社)의 볼 엔드밀을 이용하여 절삭 테스트를 수행하였으며, 본 가공에 적합한 툴을 선정하였다.

#### 3.2 가공 프로그램

전체 작업은 중심축 찾기, 기준홀 탐색, 자동탐색, 원주 가공, 홀 주위 가공의 순서로 진행된다.

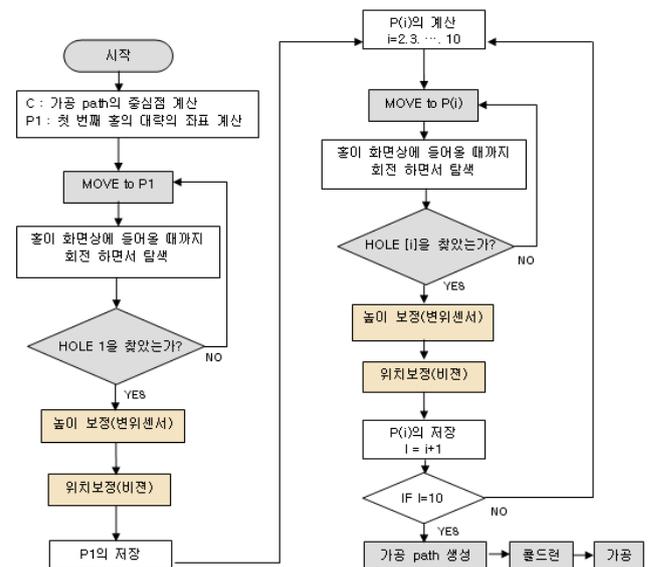


Fig. 7 Flow chart of the machining program

각각의 공정에서 로봇 및 센서의 오작동에 대한 실린더 라이너의 보호를 위해서 로봇의 좌표를 각 단계마다 확인 및 검증하여 안전한 영역 내에서만 작동하도록 하였다. Fig. 7 에 가공 프로그램의 순서도를 나타내었다.

### 3.2.1 중심축 찾기

부재 세팅 장치위로 실린더 라이너가 올려진 후 로봇의 끝단에 장치된 레이저 변위 센서를 이용하여 실린더 라이너의 내면 측정을 통해 로봇의 좌표계를 보정한다. Fig. 8 에 나타낸 것과 같이 실린더의 전후 위치에서 2 개의 원 C1, C2 를 각각 4 점 씩 값을 측정하고 이를 통해 원의 중심을 구한 뒤 두개의 원을 잇는 중심선을 형성하고 이 중심선이 비틀어진 각도를 이용하여 로봇의 좌표계를 보정한다. 측정할 좌표는 다음과 같이 CAD 정보로부터 실린더의 중앙 좌표를 이용하여 중심점에 대한 반경 벡터를 변환행렬을 이용하여 구할 수 있다.

$$R_1 = P_{C1} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -r_{cylinder} \end{bmatrix} \quad \text{----- (3.1)}$$

여기서,  $r_{cylinder}$  은 실린더 라이너의 반경이고,  $R_1$  은 중심점에서  $P_1$  까지의 반경벡터이다.

$$R_{i+1} = A_\theta R_i \quad i = 2, 3, 4 \quad \text{---- (3.2)}$$

$$\text{where } A_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{----- (3.3)}$$

여기서,  $\theta$  는 y 축을 기준으로 홀이 배열된 각도를 말한다. 식 3.3 과 같이 반경벡터를 변환하여 중심점  $P_{C1}$  을 더하여 측정 위치 좌표를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_i = P_{C1} + R_i \quad \text{----- (3.4)}$$

C1 과 C2 상의 총 8 개의 좌표에서의 레이저 변위 센서의 측정 값의 차이를 이용하여 중심점에 대한 좌표를 식 3.5 과 3.6 같이 보정할 수 있다.

$$P_{C1} = P_{C1} + \begin{bmatrix} 0.5(\Delta_{p2} - \Delta_{p4}) \\ 0 \\ 0.5(\Delta_{p3} - \Delta_{p1}) \end{bmatrix} \quad \text{----- (3.5)}$$

$$P_{C2} = P_{C2} + \begin{bmatrix} 0.5(\Delta_{p6} - \Delta_{p8}) \\ 0 \\ 0.5(\Delta_{p7} - \Delta_{p5}) \end{bmatrix} \quad \text{----- (3.6)}$$

여기서,  $\Delta_{p_i} = d_{sensor} - d_{const}$  이고,  $d_{const}$  는 센서와 실린더 내면까지의 설계자가 지정해 놓은 고정 거리 상수이다. 이렇게 수정된 좌표  $P_{C1}$  과  $P_{C2}$  를 잇는 벡터의 단위벡터를 구하고 가공을 하게될 좌표  $P_C$  의 거리를 이용하여  $P_{C1}$  으로부터 가공 좌표  $P_C$  를 구하게 된다. 또한  $P_{C1}$  과  $P_{C2}$  를 잇는 벡터를 이용하여 로봇과 실린더가 비틀어져 놓여있는 각도를 계산하여 반영한다.

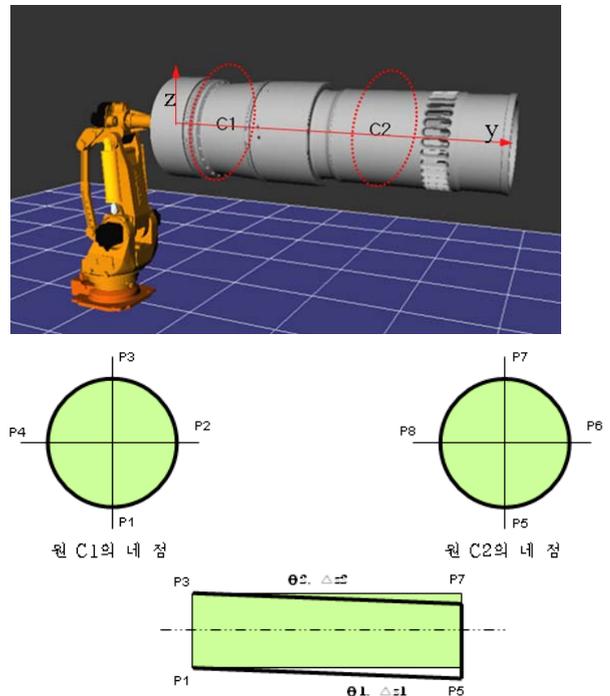


Fig. 8 Center axes finding method

### 3.2.2 기준 홀 탐색

중심축 찾기를 완료한 후 로봇은 가공을 위해 기준 홀 1 개를 찾는다. 실린더 라이너의 내면에는 지정된 개수의 홀이 배열되어 있으며, 로봇을 통해서 홀의 위치를 자동 인식하게 된다. 로봇은 가공 중심 좌표  $P_C$  에서 수직 아래 방향의 탐색 시작점  $P_1$  을 출발하여 원주방향으로 홀을 찾기 시작한다. 홀의 인식은 카메라를 이용한 비전 센서를 이용하였으며, 실린더 라이너의 종류에 따라 홀의 형상을 데이터베이스화 시켜서 이를 실제 영상 데이터와 비교하여 인식하도록 하였다. 인식된 홀의 위치정보를 로봇으로부터 획득하여

다시 최초 시작 포인트  $P_1$  을 대체 하고 기준홀 탐색을 끝내게 된다.

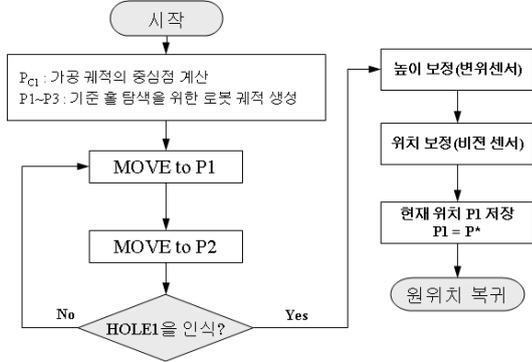


Fig. 9 Procedure of a reference hole finding

### 3.2.3 자동 탐색

자동탐색 과정은 실린더 라이너 내면에 위치한 모든 홀을 찾아서 위치를 보정하고 이를 바탕으로 가공 좌표를 생성하는 과정으로서 홀 탐색 과정과 궤적 생성 및 보정 과정으로 구분하여 진행하였다. 기준 홀의 위치를 바탕으로 식 3.4 를 이용하여 홀의 위치 좌표를 계산하고 로봇이 해당 홀의 위치로 이동한다. 그리고 Fig. 9 와 같은 원리로 변위 센서와 비전 센서를 이용하여 높이와 위치를 보정한다. 모든 홀의 탐색이 끝난 후 로봇은 원위치로 복귀하여 가공 궤적 좌표를 생성한다. 생성된 좌표로 로봇이 이동하여 실린더 내면과 툴 끝단과의 높이를 보정하게 된다.

원주 가공 궤적은 Fig. 10 과 같이 구성되며, 도면정보를 이용하여  $\Delta x$  와  $\Delta y$  를 계산하면 좌표를 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left( \frac{l_T}{l_C} \right) \quad \text{--- (3.7)}$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{r}{l_C} \right) \quad \text{--- (3.8)}$$

$$\Delta x = r \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad \text{--- (3.9)}$$

$$\Delta y = r \cos(\theta_1 + \theta_2) + (h - r) \quad \text{--- (3.10)}$$

계산된 좌표는 홀과 홀 사이를 잇는 궤적을 반복적으로 적용할 수 있으며, 궤적을 생성한 이후에는 로봇의 정밀도를 보정하기 위해서 모든 좌표로 툴을 이동시켜서 툴과 실린더 내면의 높이를 보정한다.

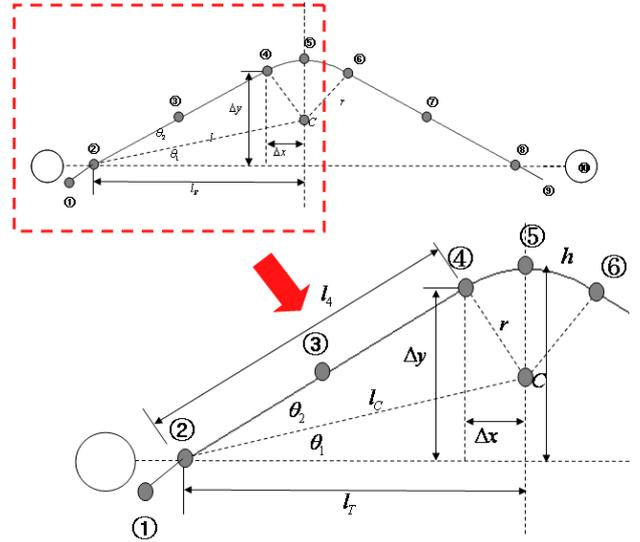


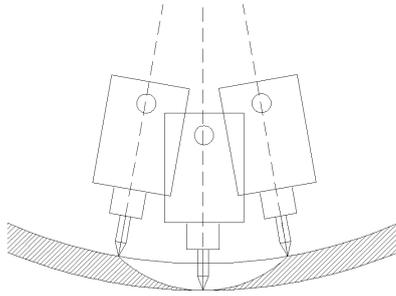
Fig. 10 Coordinates of a grinding path

### 3.2.4 원주 가공

자동탐색의 과정을 통해 원주 가공 궤적의 생성과 보정작업이 끝나면, 로봇은 홀과 홀 사이를 잇는 지그재그 형태의 원주 가공을 시작한다. 이때, 로봇은 계산된 궤적에 툴과 실린더 내면의 높이를 반영하여 툴을 실린더 내면에 접촉시켜서 모의 가공을 시작한다. 툴과 실린더 내면의 거리는 TCP 점검 과정에서 피드백되는 값을 반영하며, 또한 값의 범위를 작업자가 조정할 수 있도록 하였다. 원주 가공은 최종 가공 깊이의 90%로 2 회 가공한 뒤 표면 조도 향상을 위해 10% 1 회 가공을 적용하였다.

### 3.2.5 홀 주위 가공

원주 가공을 완료한 후 로봇은 툴 교체와 TCP 점검을 수행하게 되고 이후 홀 주위 가공을 위한 궤적 생성 및 궤적 보정 그리고 가공을 수행하며, 궤적 생성과 보정은 3.2.3 의 과정과 같다. 홀 주위 가공의 경우 가공 깊이가 최소 5mm 에서 10mm 까지 다양하므로 모델 별로 가공 반복 횟수를 다르게 적용하였으며, 1 회 가공 깊이는 진동 및 툴의 수명에 대한 실험을 통해 결정하였다. 가공 형상에 따라 툴이 절삭 각도가 균일하게 유지 되도록 Fig. 11 과 같이 로봇의 각도를 조절하여 진동과 소음을 줄이고 툴 수명을 향상 시켰다.



**Fig. 11** Tool angle consideration for the grinding path

### 3.3 특수 용도 프로그램

특수용도 프로그램은 가공 프로그램과는 별도로 로봇 운용에 필요한 작업들을 위한 것이다. 로봇 관리 및 안전 차원에서 로봇 절대 홈위치 및 홈위치 복귀 프로그램이 있다. 작업 수행 전 제적의 정확도를 위해서는 TCP 보정과 관련된 프로그램들이 있다. 그리고 원주 지그재그 궤적 가공과 홀 주위 가공을 위한 커터 교체 프로그램도 포함되어 있다.

## 4. 결론

본 과제에서는 실린더라이너 오일그루브 가공 작업을 자동화하는 로봇 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 로봇, 부재 세팅장치, 센서 및 제어 시스템 등으로 구성되어 있으며 현장에 적용되어 가공을 수행하고 있다. 수작업에 의존하여 가공되어 오던 오일그루브 가공 작업을 자동화 하였다. 또한 현장 적용 후 약 3 개월간의 가공 조건 및 현장 적용을 통한 보완 작업으로 당사에서 생산되는 12 개 모델에 대한 다양한 가공 형상과 조건에 대응하고 있다. 특히, 특정 모델의 경우 까다로운 그루브 형상으로 인한 과도한 가공 시간을 2 시간으로 줄였다. 가공 반력에 대한 로봇의 강성 부족으로 인한 절삭 커터의 수명이 짧은 단점으로 제기되고 있다. 커터의 수명 및 가공 조건을 Table 1 에 나타내었다. 본 연구에서 개발된 시스템은 실제 가공 공정에 적용되는 가공 장비로서 가장 중요하게 고려되어야 하는 것은 안전과 오작동에 대한 대책이다. 때문에 로봇 및 제어시스템은 항상 영역에 대한 좌표를 확인하여 작동하며, 동작에 대한 타당성 및 가공에 대한 기본적인 오작동 대책 들이 반영되어 있다.

본 연구를 통해서 로봇을 이용한 실린더라이너 내부 오일그루브 가공에 대한 적용성이 검증되었으며, 이를 통해 향후 생산성 향상을 위해서는 장비 증설과 라인 개념의 설계를 도입하여 실린더 라이너 오일그루브의 가공 공정의 자동화가 필요할 것으로 판단된다.

**Table 1** Tool life and conditions

	가공횟수 /모델	가공시간/ (모델)	가공거리 /모델	툴수명 (모델)
원주 가공	3 회	25~30 분	9000~10000 (mm)	3~4
홀주위 가공	7~10 회	30~45 분	5000~9700 (mm)	2~3

## 후 기

본 연구는 현재 현대중공업 엔진사업본부의 생산공정에 적용하고 있다.

## 참고문헌

- (1) Parviz E. Nikraves, 1988, "Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems", *Prentice Hall*, pp. 347~352.
- (2) 현대중공업, 2001, "Hi4 제어기 조작 설명서", *현대중공업*, pp. 11-1~11-20.