

3축 그라인딩 로봇을 이용한 자동 경로 생성 및 능동 컴플라이언스 힘 제어

Auto Path Generation and Active Compliance Force Control Using 3-axis Grinding Robot

추 정 훈*, 김 수 호, 이 상 범, 김 정 민
(Jung-hoon Choo, Soo-ho Kim, Sang-bum Lee, and Jung-min Kim)

Abstract : In this paper, an auto path generation and an active compliance grinding control using 3-axis force sensor are presented. These control algorithms enable the grinding robot to follow unknown path of various workpiece shape pattern. The robot is able to go grinding along unknown paths by position controller managing tangential direction angle and cutting speed, with only information about the start position and the end position. Magnitude and direction of normal force are calculated using force data that go through low pass filter. Moreover, normal and tangential directions are separated for force control and velocity control, respectively.

Keywords : grinding, force control, edge cutting, auto path generation, active compliance control

1. 서론

그라인딩의 사전적인 의미는 회전 숫돌로 가공물의 표면을 갈아 반들반들하게 하는 일을 말한다. 엄밀히 말한다면, 본 논문에서 말하는 그라인딩은 면취에 가깝다고 할 수 있다. 여기서 면취란, 금속 가공을 할 때 직각 또는 각진 모서리 부분을 모따기 처리(chamfer) 한다든지 둥글게 가공 처리(rounding) 하는 것을 말한다. 그러나, 물체의 표면을 다듬질 하는 개념이 같고 산업현장에서 통상적으로 사용하는 용어이기 때문에 앞으로 그라인딩이라 하겠다.

그라인딩을 하는 목적은 여러 가지가 있겠지만, 조선 산업에서의 목적은 페인팅 수명을 연장시키기 위해서 이다. 선박은 항상 물과 접촉하기 때문에 쉽게 녹이 슨다. 그래서, 페인팅을 해 주지만, 페인팅을 한 후 오랜 시간이 지나면 모서리 부분부터 벗겨지기 시작하므로, 이 부분을 그라인딩 해서 둥글게 처리해 주고 페인팅을 하면 그 수명이 연장된다.

몇 해 전부터 선주들은 그 중요성을 깨닫고 모든 조선 블록에 그라인딩을 요구해 오고 있다. 소부재만해도 연 100만 개 이상을 그라인딩 해야 하므로 그것을 하는 작업자에게는 무척 힘든 일이 되었고, 그와 더불어 많은 작업자들에게 근골격계 질환이 발생하게 되었다. 그래서, 로봇 자동화를 통해 이 문제를 조속히 해결해야 할 필요성을 가지게 되었다.

국내에서의 로봇 그라인딩 제어 기술에 관련된 연구는 크게 활성화 되지 못한 실정이다. 1993년 Kang[1]은 작업영역 안에서 각 자동차 지붕과 옆판의 용접 비드를 센싱하고 2차원 시각 센서 시스템을 이용해 추출된 데이터로 그라인딩 경로를 만들어 내고 실시간 작업을 수행하였으며, 1997년 Lee와 Choi[2,3]는 프로펠러 날개를 그라인딩 하기 위해 직렬과 병렬로봇을 조합한 고강성의 하이브리드 기구를 이용해서 실시간 위치, 속도 제어를 수행하였다.

국외에서 1985년 Asada와 Goldfine[4]은 그라인딩을 하는 동안 발생하는 진동을 감소시키기 위해 구동기를 뒤틀이거나 능동적 제어를 하지 않고 동역학적 해석, 시뮬레이션, 실험을 통해 결정된 최적의 컴플라이언스 도구 지지대를 설계하였다. 1988년 Asada와 Asari[5]는 직접 교시에 의한 인간 동작의 임피던스 규명을 통해 입력된 힘과 위치 데이터를 분석함으로써 로봇을 제어했고, 1990년 Kashiwagi[6]는 두 가지 알고리즘, 즉 '경사도 예측법(gradient prediction method)'과 '순차적 강성법(progressive stiffness method)'을 통해 그라인딩 작업을 위한 힘 제어를 수행하였다. 1991년 Lu[7]는 슬라이딩 모드를 이용한 임피던스 제어를 제안하였고, 1996년 Jenkins[8]는 그라인딩 시스템의 강인한 힘 제어를 위한 보상을 함에 있어 법선 방향과 접선 방향의 제어루프를 나누어 설계하였다. 그리고 2000년 Wang[9]은 그라인더의 접촉 힘을 관측하여 법선 방향에 원하는 힘을 적용하기 위한 능동적인 토크 제어를 하였다.

또한, 타 분야에서는 디버링 로봇 등이 개발되어 오고 있지만, 조선 자동화 분야에서는 아직 미개발 단계인 것으로 알고 있다. 기존 디버링 로봇 같은 경우에는 미리 CAD 데이터나 vision 등으로 로봇에 경로를 입력시켜 작업을 하였다. 그러나, 로봇과 부재가 접촉하면서 작업이 진행되기 때문에 큰 충격력이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 로봇 끝단

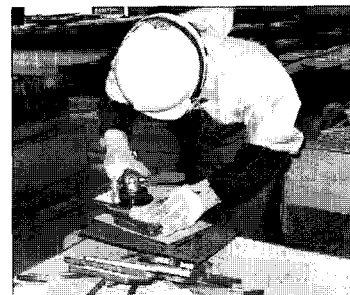


그림 1. 조선 현장 그라인딩 장면.
Fig. 1. Grinding work in shipbuilding factory.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 1. 6., 채택확정 : 2006. 8. 25.

추정훈, 김수호, 이상범, 김정민 : 대우조선해양(주) 자동화연구소
(jhchoo@dsme.co.kr/shkim2@dsme.co.kr/sangbumlee@dsme.co.kr/jmin209@dsme.co.kr)

에 passive compliance tool을 부착하여 충격을 흡수하게 되었다. 하지만, compliance 영역에 한계가 있어서 CAD 데이터와 실제 부재의 위치 오차가 발생할 때 그것을 능동적으로 처리하지 못해 가공 불량률을 낳게 되는 단점이 있다. 또한, 다양한 부재들에 대한 CAD 데이터를 로봇이 모두 갖고 있어야 하는 부담감도 있고, vision 처리 속도의 문제도 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 여러 가지 문제를 해결하기 위한 방안으로 힘 센서를 이용한 자동 경로 생성 및 active compliance 제어를 제안하게 되었다. 이 방법은 CAD 데이터 없이 사용자가 로봇에게 첫 위치와 끝 위치만 가르쳐 주기만 하면, 힘 센서를 통해 접촉 힘 제어를 하며 스스로 위치 경로를 찾아가면서 가공하게 된다. 여기서, 본 그래인딩 시스템은 위치 제어기를 사용하였음을 밝힌다.

II. 제어 이론

1. 절삭면 경로 추종 이론

그래인딩을 할 때 가장 중요한 것은 너무 깊이가 가공되거나 유연하지 않고 부재면을 부드럽게 따라가는 것이다. 1차원 그래인딩에서는 절삭 진행 방향과 부재면의 접선 방향이 평행하기 때문에 법선력만 제어하면 된다. 2차원 그래인딩에서는 부재면의 접선 방향을 알 수 없기 때문에 법선력을 제어 하면서 부재를 따라가기가 힘들다. 부재면의 접선 방향은 과거 위치 경로를 통한 방법과 현재의 센싱된 힘 값을 이용하는 방법 등으로 추정해낼 수 있다.

(1)은 과거 위치 경로를 통해 부재면의 접선 각도를 알아내는 계산식이다. 이 방법은 부재면의 굴곡이 많지 않고 대체적으로 직선 구간이 많을 때 큰 효과를 볼 수 있다. 하지만, 과거의 위치 값을 이용함으로써 인해 부재면의 굴곡이 많을 때 깊이가 가공되거나 쉽게 유연하게 되는 단점이 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \tag{1}$$

다른 방법으로는 힘 센서를 통해 센싱된 힘 값을 이용하여 부재면의 접선 각도를 알아내는 것이다. (2)는 그 계산식이며, 이 방법은 직선 구간에서 빠른 속도를 내는 데는 불리할 수 있지만, 부재면의 굴곡이 심하더라도 대체적으로 잘 따라간다.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{F_y}{F_x} \right) \tag{2}$$

그러므로, 두 가지 방법을 혼합해서 θ_2 를 주로 사용하여 부재면을 잘 따라가게 하고, $\Delta\theta_1$ 을 이용하여 절삭 속도와 방향을 조금씩 조절하는 것이 효과적일 것이다. 이와 관련된 사항은 그래인딩 이론 부분에서 더 자세히 다룰 것이다.

일반적으로 그래인딩 접촉은 롤러 접촉과는 다른 양상을 보인다. 그림 2에서 보는 바와 같이 롤러 접촉의 특징은 마찰력이 거의 없어서 힘 센서로 센싱되는 힘은 접촉면의 법선력으로 볼 수 있다. 그래서 그 법선 각도를 계산하여 접선 방향 이동을 할 수 있다.

그러나 그래인딩 접촉은 절삭을 하면서 접선 방향으로 이동해야 하기 때문에 절삭력이 발생한다. 이 절삭력으로 인해

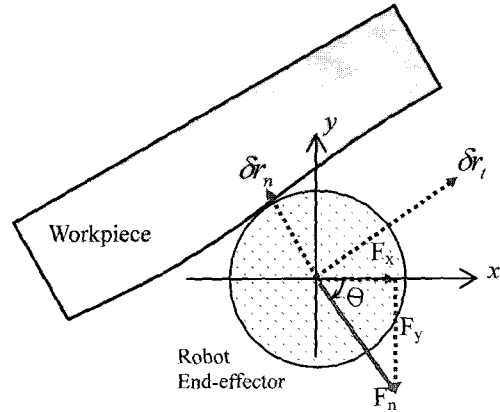


그림 2. 롤러 접촉 시 로봇 끝단 분력. Fig. 2. Force component of robot end-effector during roller contact.

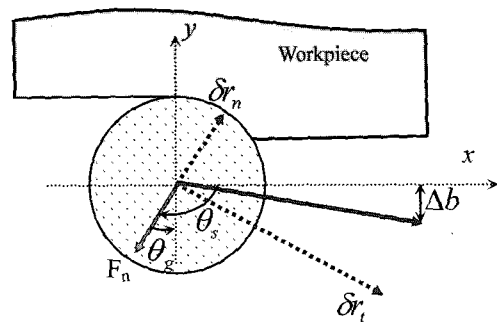


그림 3. 유연성이 발생하는 경우. Fig. 3. Breakaway occurrence case.

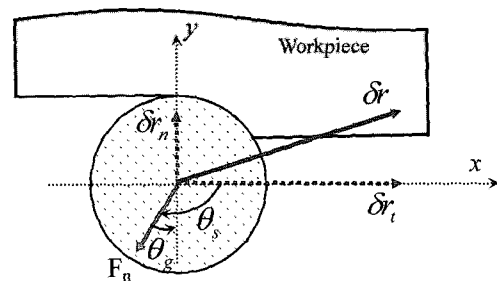


그림 4. 절삭면을 잘 따라가는 경우. Fig. 4. Good tracking case.

센싱되는 힘은 법선력으로 보기 힘들다.

그림 3은 센싱되는 힘을 법선력으로 보았을 때 절삭면을 이탈하는 유연현상을 보여준다. 절삭면을 x축과 평행하게 놓고 그래인딩을 하였을 때, 센싱되는 힘 F_n 은 θ_g 만큼 더 기울어져 있다. 이를 근거로 법선 방향 제어(δr_n)를 하고, 접선 방향으로 δr_t 로 이동하였을 때, Δb 만큼 절삭면에서 이탈한 것을 알 수 있다. 절삭 속도를 증가하기 위해 δr_t 값을 더 증가시킨다면 Δb 의 양은 더 증가할 것이다.

이를 막기 위해 δr_n 을 증가시키는 것도 한 방법이지만, 접촉력이 과도하게 커져서 그래인더 날 파손 또는 로봇에 과부하를 초래하게 된다.

그림 4는 이상적으로 그래인딩을 하면서 절삭면을 따라가

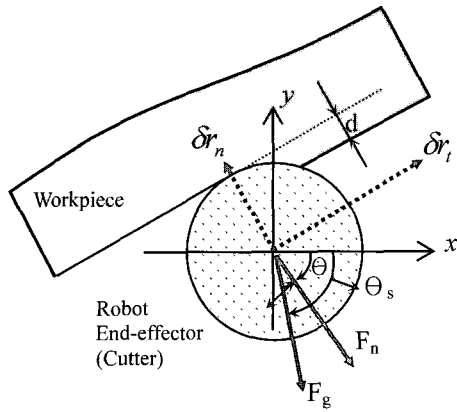


그림 5. 작업물 grinding시 로봇 끝단 분력.
Fig. 5. Force component of robot end-effector during grinding contact.

는 경우를 나타낸다. 센싱되는 힘 F_n 이 θ_g 만큼 기울어져 있지만 이를 역으로 보상하여 절삭면과 수직하게 법선 방향 제어(δr_n)를 하고, 접선 방향으로 δr_t 로 이동한다. 법선 방향으로 일정하게 힘을 가하기 때문에 절삭량도 일정하고, 접선 방향으로 속도를 높여도 유명하지 않는다.

여기서 θ_g 를 계산해 내는 것이 가장 중요한 문제이며, 이것은 절삭 깊이와 절삭 속도의 영향을 받는 것으로 보인다.

2.그라인딩 제어 이론

그라인딩 접촉 시 로봇 끝단 힘 분포는 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, F_g 는 그라인딩 시 센싱되는 합력, θ_s 는 그 각도, F_n 은 F_g 에서 작업면에 대한 법선 성분, θ 는 F_n 의 각도, θ_g 는 $\theta - \theta_s$ 를 각각 말한다. 그리고, 절삭날 회전방향은 CW 방향이며, d는 절삭 깊이를 말한다. 그림 6은 그라인딩 로봇 제어를 위한 전체 블록도를 나타내며, 그에 대한 설명은 본 장에서 자세히 다루어 나가도록 하겠다.

2.1 Filtering

5,500~6,000rpm으로 회전하는 그라인더로부터 센싱된 힘

정보에는 많은 노이즈 성분이 포함되어 있다.

본 연구에서는 이를 필터링 하기 위해 H/W 및 S/W 이중 구조로 되어있는 Low Pass Filter를 사용하였으며, Cut-off Frequency는 10Hz로 하였다.

2.2 법선력 및 각도 계산

힘 센서에서 얻어지는 F_x , F_y 를 통해 다음과 같이 법선력과 그 각도를 계산해 낼 수 있다.

$$F_g = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \tag{3}$$

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \tag{4}$$

$$F_n = F_g \cos\theta_g \tag{5}$$

여기서, θ_g 는 법선력(절삭 깊이)과 접선방향 절삭속도의 영향을 받으며, 절삭속도에 따라 $15^\circ \leq \theta_g \leq 45^\circ$ 로 가변하여 사용하였다.

2.3 법선 방향 힘 제어

원하는 만큼의 그라인딩 절삭량을 만들어 내기 위해서는 일정한 힘으로 절삭면을 눌러 주어야 한다. 일정한 목표 힘 F_d 에 대한 법선력 F_n 의 오차 F_e 를 이용하여 법선 방향 힘 제어를 하였다.

$$F_e = F_d - F_n \tag{6}$$

$$\delta r_n = \frac{F_e}{K} \tag{7}$$

$$\delta r_{nc}(n) = K_P \delta r_n(n) + K_D \frac{\delta r_n(n) - \delta r_n(n-1)}{T} \tag{8}$$

(7)에서 K ($\approx 250,000\text{N/m}$)는 시스템 강성을 나타내며, 그 결과 값을 PD제어하여 단위 샘플링당 법선 방향 변위량 δr_{nc} 를 계산해 낸다. 여기서, T 는 샘플링 시간($\approx 10\text{msc}$)이다.

2.4 접선 방향 속도 제어

법선 방향 힘 제어에 따라 그라인딩 절삭 깊이를 조절할

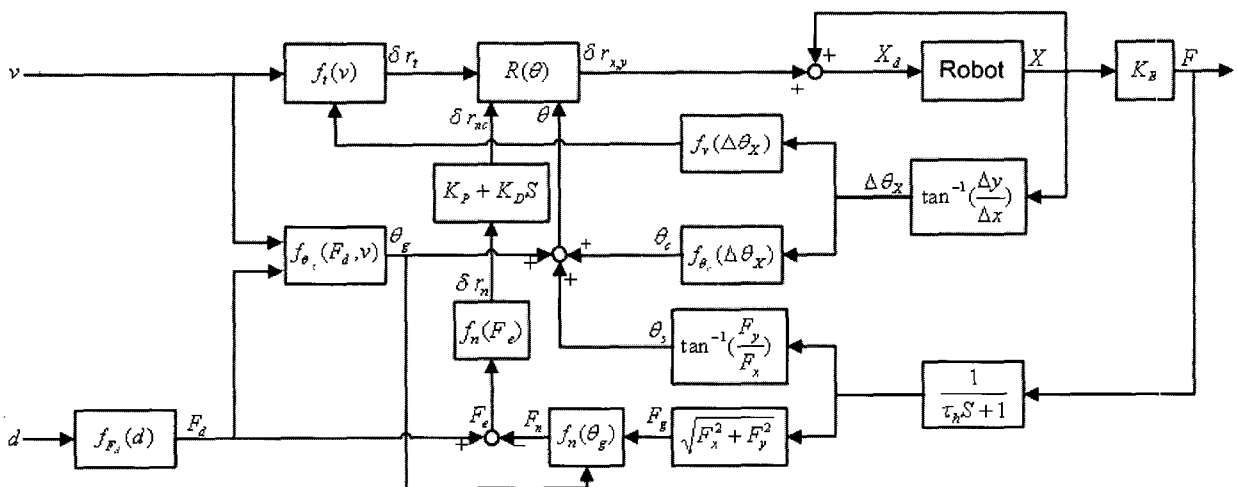


그림 6. 그라인딩 제어 블록도.
Fig. 6. Grinding control block diagram.

수 있다면, 접선 방향 절삭속도에 따라서 그라인딩 품질이 달라진다. 그라인더 회전수가 일정할 때, 느린 속도로 절삭된 면을 보면 물결 무늬가 촘촘하며 품질이 고른 반면, 빠른 속도로 절삭된 면을 보면 물결 무늬가 듬성듬성 있고 표면이 울퉁불퉁한 것을 알 수 있다.

(9)는 사용자가 지정한 속도(v [mm/sampling])로 그라인딩 할 때의 단위 샘플링당 접선 방향 변위량 δr_t 를 계산한 것이다. 이 속도는 2.6절에서 설명하는 바와 같이 부재 형상 패턴에 따라 가변되는 값이다.

$$\delta r_t = vT \tag{9}$$

2.5 제어 좌표변환

로봇 명령어 생성을 위해 법선 및 접선 방향 변위량을 x, y 좌표로 변환해 줄 필요가 있다. (10)은 좌표변환 행렬을 나타낸다.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\pi + \theta) & \cos(\frac{\pi}{2} + \theta) \\ \sin(\pi + \theta) & \sin(\frac{\pi}{2} + \theta) \end{bmatrix} \tag{10}$$

(11), (12)는 좌표변환 행렬을 통해 얻어진 x, y 변위량을 나타낸다.

$$\delta r_x = \delta r_{nc} \cos(\pi + \theta) + \delta r_t \cos(\frac{\pi}{2} + \theta) \tag{11}$$

$$\delta r_y = \delta r_{nc} \sin(\pi + \theta) + \delta r_t \sin(\frac{\pi}{2} + \theta) \tag{12}$$

위의 값을 로봇 현재 위치값에 더하면 (13), (14)와 같은 다음 로봇 위치값을 구할 수 있다.

$$X_d = X_{current} + \delta r_x \tag{13}$$

$$Y_d = Y_{current} + \delta r_y \tag{14}$$

2.6 부재 형상 패턴 별 추종 및 속도 제어

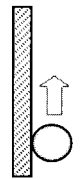


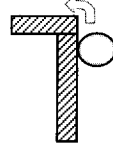
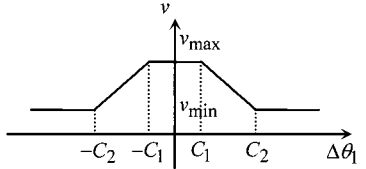
가공 부재의 형상은 크게 직선, 내원, 외원, edge 부위로 나누어 진다. 각 형상 별로 접선 방향과 속도를 조절해 주지 않으면 외원 형상에서 유연하거나 내원 형상에서 깊이가 가공하게 된다. 형상 패턴을 추정하기 위해서 (1)에서 θ 의 변화량을 이용한다. 여기서, $C1(\approx 0.1^\circ)$ 은 접선 방향 조절 임계 각도 변화량이며, $C2(\approx 0.3^\circ)$ 는 Edge에서의 임계 각도 변화량이다. 그리고, θ_c 는 접선 방향을 조절해 주는 각도 성분인데 θ_g 의 보조적인 역할을 담당하기 때문에 그 각도 범위를 좁게 둔다. (15)는 θ_c 를 구하는 공식이며, C는 결과값의 기울기를 조절해 주는 실험값이다. v_{max} , v_{min} 은 설정된 최대, 최소 절삭속도를 말하며, 각각 50, 5mm/s로 두고 실험하였다.

다시 말해, $\Delta\theta$ 을 C_1 , C_2 와 비교하여 형상 패턴을 추정하고, 추정된 형상에 대해 그라인딩 진행 방향과 진행 속도를 조절한다는 것이다. 그 자세한 내용은 표 1과 같다.

$$\theta_c = C(\Delta\theta)^3 \tag{15}$$

표 1. 절삭면 형상 패턴 별 접선방향 조절 각도(θ_c) 및 절삭속도.

Table 1. Cutting speed and angle according to workpiece shape.

형상 패턴	직선	내원	외원	Edge
그림				
$\Delta\theta_1$	$-C_1 \leq \Delta\theta_1 \leq C_1$	$\Delta\theta_1 < -C_1$	$\Delta\theta_1 > C_1$	$\Delta\theta_1 > C_2 > C_1$
θ_c	$= 0$	< 0	> 0	$\gg 0$
v	v_{max}	v_a	v_b	v_{min}
				

$$v_a = \frac{v_{min} - v_{max}}{C_1 - C_2} (\Delta\theta_1 + C_2) + v_{min} \tag{16}$$

$$v_b = \frac{v_{min} - v_{max}}{C_1 - C_2} (-\Delta\theta_1 + C_2) + v_{min} \tag{17}$$

(16), (17)은 각각 내원, 외원 구간에서 $\Delta\theta_1$ 에 따른 그라인딩 진행 속도 명령을 구하는 식이다.

III. 그라인딩 로봇 시스템 구성

그림 7(a)는 3축 active compliance 그라인딩 로봇 시스템을 나타낸다. 본 로봇시스템은 3축 직교좌표 로봇(X-Z-Y type), piezo type 3축 힘 센서, 면취기용 공압 그라인더, 소부재 고정용 magnetic base, 제어기 시스템 등으로 구성된다.

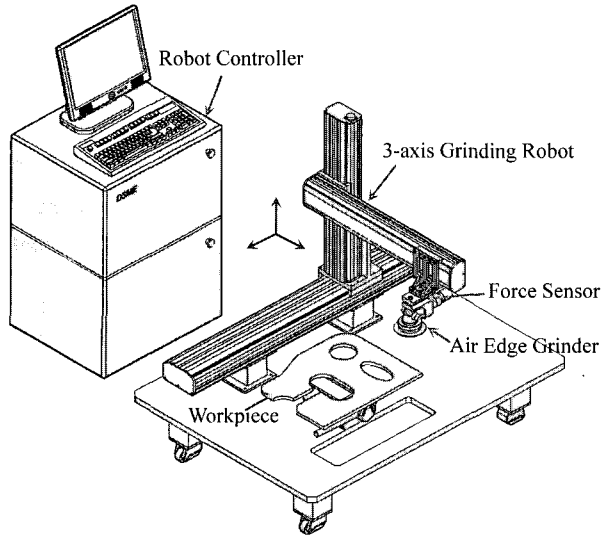
3축 직교좌표 로봇은 ball screw 구동방식이며, X, Y, Z축 각각의 lead는 20, 20, 10mm이다. X, Y축 각각의 기계적 강성은 214N/mm, 390N/mm이므로, 이를 감안한 힘 제어가 필요하다.

그림 8은 3축(F_x , F_y , F_z) 피에조 힘 센서(KISTLER社; Type9602A3201)를 보여준다. 이 센서는 amplifier 내장형으로 크기가 $25 \times 56.9 \times 10$ mm로 소형이지만, 측정 범위는 F_x : ± 2.5 kN, F_z : ± 5 kN 이고, 가격도 비교적 저렴하다.

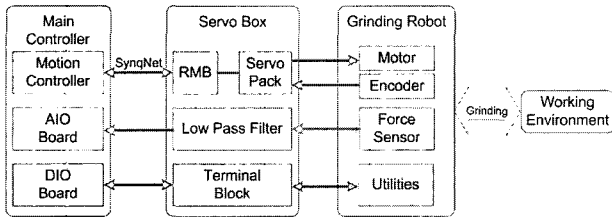
그러나, Z축 방향으로 25kN의 예압을 주어야 하며, 마찰로 인한 F_{xy} 추출 방식이기 때문에 충격이 주어질 때 미끄러짐 현상이 발생하고, 측정 범위가 큰 만큼 분해능이 떨어지는 단점이 있다.

힘 센서에서 나오는 analog force data는 노이즈 성분이 많아 자체 제작한 H/W low pass filter (cut-off frequency : 10Hz)를 사용하여 필터링 하였다.

그림 9의 면취기용 공압 그라인더는 조선환경에서 사용되는 것으로, 6~7bar의 공압에서 무부하 상태일 때 5,500~6,000rpm으로 회전한다.



(a) System figure



(b) System structure

그림 7. 3축 그라인딩 로봇 시스템.
Fig. 7. 3-axis grinding robot system.

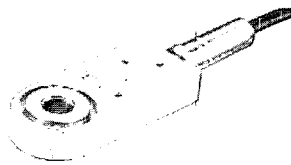


그림 8. 3축 피에조 힘 센서.
Fig. 8. 3-axis piezoelectric force sensor.

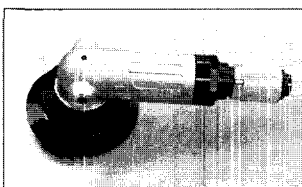


그림 9. 공압 면취기 그라인더.
Fig. 9. Air edge grinder.

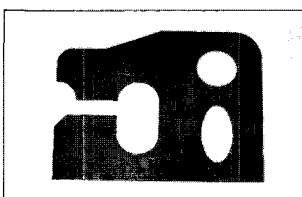


그림 10. 시험 부재.
Fig. 10. Test workpiece.

그림 10은 그라인딩 시험용 부재인데, 소부재 그라인딩 시 나타날 수 있는 대부분의 형상 패턴을 고려하여 제작하였으며, 크기는 500×400×12mm이다.

사용된 제어기는 그림 7(b)에서 보여주듯이 거대 하고 열악한 조선현장 환경에 맞게 대우조선해양(주) 로봇연구소에서 자체 제작한 것으로, control box와 servo box가 분리되어 사용자 편의성과 노이즈에 대한 내환경성을 가질 수 있게 되었다. 제어 S/W는 Windows XP 환경 하에서 위치 제어를 하였다.

IV. 실험 및 결과

본 연구에서는 크게 부재 형상 별 추종 성능 실험과 절삭 속도 항상 실험을 실시하여 만족할 만한 결과를 얻었는지 검토하여 보았다. 부재 형상 별 추종 성능 실험은 직선, 내면원, 외면원, edge에서 유영하거나 깊이 가공하지 않고 부드럽게 따라가는지를 확인하였다. 또한, 절삭 속도 항상 실험은 직선 구간을 얼마나 빠르게 그라인딩 하면서 진행해 나갈 수 있는지를 확인해 보았다.

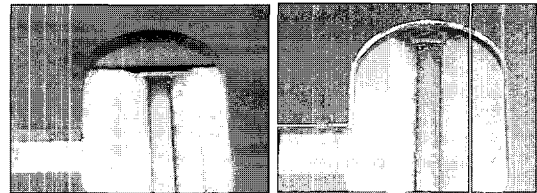


그림 11. Slot hole 그라인딩 (가공 전, 후).
Fig. 11. Slot hole grinding (before and after).

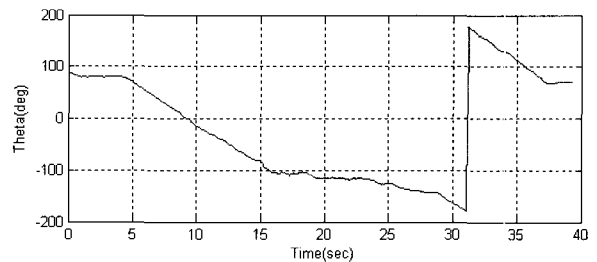
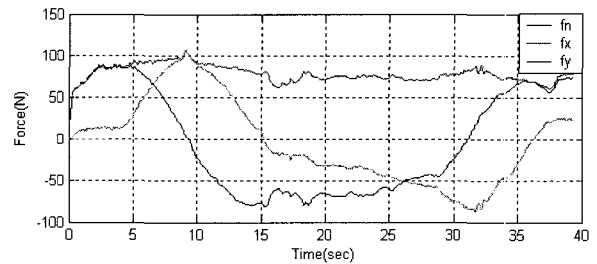
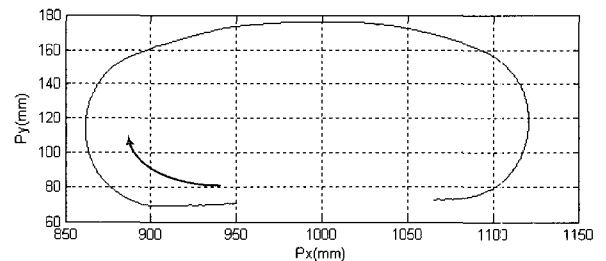


그림 12. Slot hole 그라인딩 가공.
Fig. 12. Slot hole grinding.

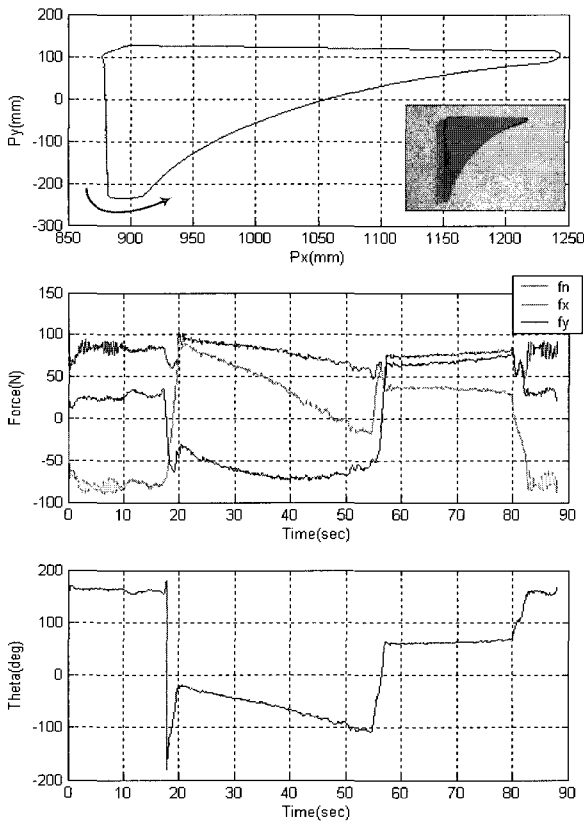


그림 13. Stiffner 그라인딩 가공.
Fig. 13. Stiffner grinding.

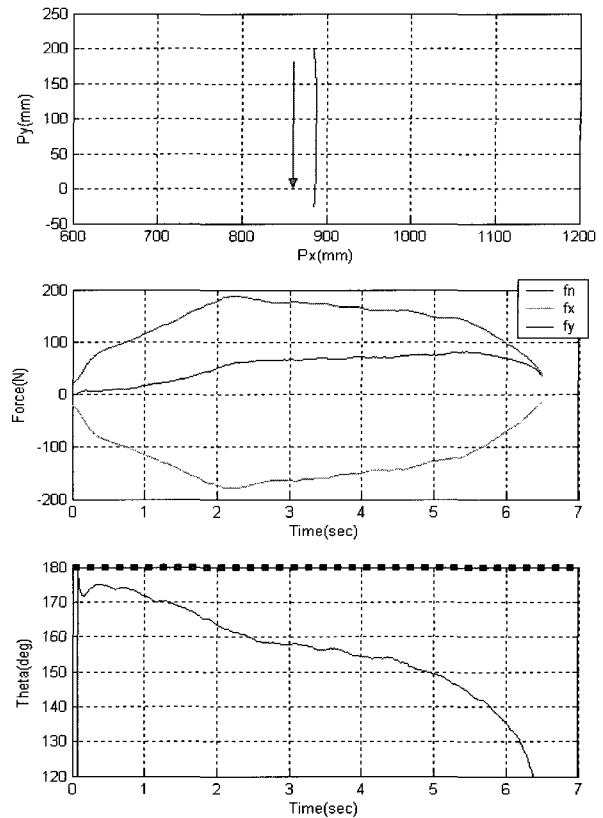


그림 15. 직선구간 그라인딩 가공(45mm/s).
Fig. 15. Straight line grinding.

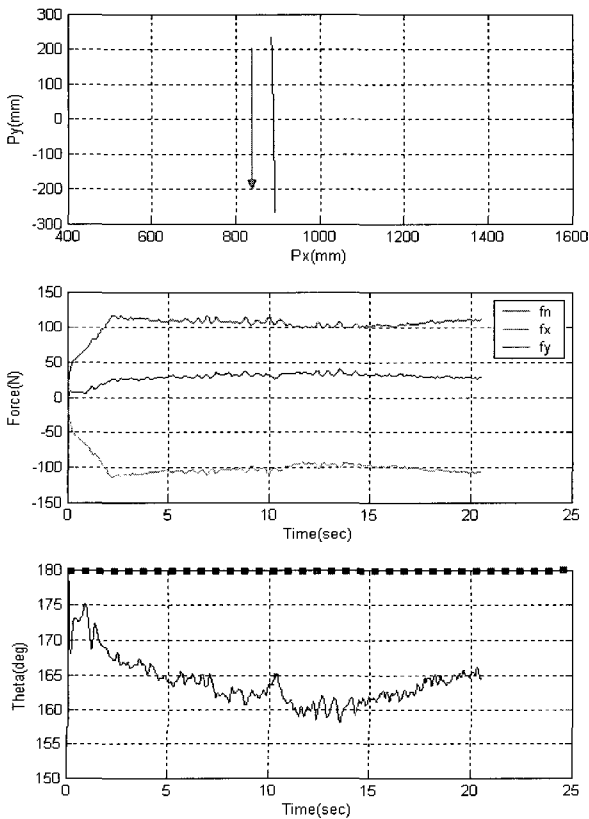


그림 14. 직선구간 그라인딩 가공(10mm/s).
Fig. 14. Straight line grinding.

먼저, 그림 12는 slot hole의 내면원 구간을 3mm 절삭 깊이, 약 10mm/s의 절삭 속도, 70~80N의 법선력으로 그라인딩 실험한 결과이다. 첫 번째 그림은 전체적인 위치 궤적을 나타내며, 두 번째 그림은 시간대 별로 각 축에 센싱된 힘과 그 합력(법선력)을 보여주며, 세 번째 그림은 그 때 측정하여 계산된 법선력의 각도 (θ_s)이다. 여기서, 법선력의 각도는 degree 단위이며, 계산 범위가 $\pm 180^\circ$ 인 'ATAN2' 함수를 프로그램에서 사용하였기 때문에 데이터가 튀는 것처럼 보이지만 실제 계산 상으로는 아무 문제가 없다. 그리고, F_x , F_y 가 형상 변화에 따라 변화되지만 그 합력은 일정하게 유지되며 부드럽게 따라가는 것을 알 수 있다.

그림 13은 stiffner 부재를 그라인딩 한 실험 결과인데, 이 부재는 직선, 내면원, edge 등의 형상을 가지고 있다. 여기서 주목할 것은 edge 부위에서 법선력이 순간 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이때 속도를 높이거나 접선방향 각도 조절을 해주지 않으면 쉽게 유명하게 된다.

그림 14는 직선 구간을 그라인딩하여 작용되는 힘과 법선력의 각도를 알아 보았다. 두 번째 그림을 보면 측정된 힘이 서서히 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 2초 정도 가속 구간을 두었기 때문이다. 왜냐하면, 처음부터 목표 속도로 절삭을 하게 되면 접선 방향으로 큰 충격력이 발생하여 법선력의 각도가 접선 방향으로 더 기울게 되며 쉽게 유명되는 현상이 일어난다. 세 번째 그림은 센싱된 법선력 각도(θ_s)를 보여주며, 물러 구동 시 발생하는 법선력 각도(θ ; 여기서는 180° , 접선) 기준에서 접선 방향으로 기울어진 정도(θ_g ; 5~20°)를

알 수 있다. 그림 14와 그림 15의 접선 방향 힘을 비교해 보면 속도가 10mm/s, 45mm/s일 때 각각 35N, 70N 정도 나오는 것으로 보아 접선 방향 힘은 절삭 속도에 비례한다는 것을 쉽게 알 수 있다. 그리고, 법선 방향 힘은 각각 110N, 약 120~170N이며, 이는 비교적 빠른 속도로 진행할 때 유명하지 않기 위해서 법선 방향으로 더 큰 힘을 주었기 때문이다.

그림 15의 두 번째 그림에서 5초 이후 법선력이 점점 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 실험 당시 유영은 발생되지 않았으나 유영 상태로 접어들고 있었다는 것을 알 수 있다. 이는 빠른 속도에서 절삭면을 따라가며 그라인딩을 하는 것이 쉽지 않음을 단적으로 보여주는 예라 할 수 있겠다.

V. 결론

본 논문에서는 힘 센서를 이용한 자동 경로 생성 및 active compliance 그라인딩 제어를 제안하였다. Low pass filter (cut off frequency : 10Hz)를 거친 힘 데이터를 분석하여 법선력과 그 각도를 계산하였으며, 그것을 바탕으로 법선 방향으로의 힘 제어, 접선 방향으로의 속도 제어를 하며 알려지지 않은 경로에 대해 그라인딩 실험을 해 보았다. 또한, 다양한 부재 형상 패턴에 따른 접선 방향 각도 및 절삭 속도 제어 방법을 소개하였다. 본 그라인딩 로봇 시스템을 통하여 그라인딩 작업자들을 로봇 운용자로 전환시키며, 문제가 되었던 근골격계 질환 예방과 그라인딩 품질 균일화 및 고급화를 실현할 수 있게 될 것으로 보인다.

향후 과제로는 그라인딩 절삭 깊이와 절삭 속도에 따른 법선력 각도 변화를 명확히 규명하는 것, guide roller 같은 어떤 도구에 의하지 않고 절삭 깊이를 제어하는 것, 빠른 절삭 속도에서도 부재면을 부드럽게 따라가는 제어 방법 개발, 유영 후 재진입 알고리즘 개발 등이 있다.

참고문헌

[1] H.-S. Kang, W.-H. Lee, J.-O. Park, G.-S. Lee, and H.-O. Shin,

“Grinding robot system for car brazing bead” *Proceedings of KACC*, pp. 160-163, 1993.

- [2] M. K. Lee, K. W. Park, and B. O. Choi, “Study on robot program for propeller grinding.” *Proceedings of the 2nd Asian control Conference*, Seoul, pp. 695-698, July 22-25, 1997.
- [3] B. O. Choi and M. K. Lee, “Position and velocity control of a hybrid (Parallel-Serial) robot manipulator for propeller grinding.” *The Institute of Control, Automation and Systems Engineers*, Korea, March, pp. 29-34, 1999.
- [4] H. Asada, N. Goldfine and Mar, “Optimal compliance design for grinding robot tool holders,” *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 316-322, 1985.
- [5] H. Asada and Y. Asari, “The direct teaching of tool manipulation skills via the impedance identification of human motions.” *Robotics and Automation, 1988. Proceedings, 1988 IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 1269-1274, 24-29 April 1988.
- [6] K. Kashiwagi, K. Ono, E. Izumi, T. Kurenuma, and K. Yamada, “Force controlled robot for grinding.” *Intelligent Robots and Systems '90. 'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS '90. IEEE International Workshop on*, vol. 2, pp. 1001-1006, 3-6 July 1990.
- [7] Z. Lu, S. Kawamura, and A. A. Goldenberg, “Sliding mode impedance control and its application to grinding tasks.” *Intelligent Robots and Systems '91. 'Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS '91. IEEE/RSJ International Workshop on*, vol. 1, pp. 350-355, 3-5 Nov. 1991.
- [8] H. E. Jenkins, T. R. Kurfess, and R. Cl. Dorf, “Design of a robust controller for a grinding system.” *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 4, pp. 40-49, Jan. 1996.
- [9] Y. T. Wang and Y. J. Jan, “A robot-assisted finishing system with an active torque controller.” *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, vol. 2, 24-28, vol. 2, pp. 1568-1573, April 2000.



추 정 훈

2000년 영남대학교 기계공학과 졸업.
2003년 동 대학원 졸업. 현재 대우조선
해양(주) 자동화연구소 선임연구원. 관심
분야는 로봇 힘제어, Teleoperation, Haptics.



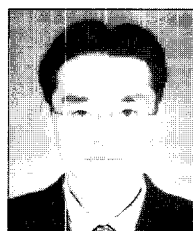
김 수 호

1980년 서울대학교 전기공학과 졸업.
현재 대우조선해양(주) 자동화연구소장.
관심분야는 실시간 능동 힘제어.



이 상 범

1993년 중앙대학교 기계공학과 졸업.
1999년까지 삼성전자 메카트로닉스센터
근무. 현재 대우조선해양(주) 자동화연구
소 선임연구원. 관심분야는 Robust &
Optimal Design.



김 정 민

2003년 한양대학교 기계공학과 졸업.
2006년 동 대학원 졸업. 현재 대우조
해양(주) 자동화연구소 연구원. 관심분야
는 다물체 동역학, Robust & Optimal
Design.