

면취 공정의 능동 제어를 위한 공압식 자동 강재 면취기와 센서 시스템의 제작 및 실험

나영민*, 이현석*, 김민효**, 박종규*:#

*창원대학교 기계공학부, ** (주)세라코

Fabrication and Experiment of Pneumatic Steel Plate Chamfering Machine and Sensor System for Active Control of Chamfering

Yeong-min Na*, Hyun-seok Lee*, Min-hyo Kim**, Jong-kyu Park*:#

*School of Mechatronics, Changwon National UNIV., **CERACO®

(Received 25 August 2020; received in revised form 14 September 2020; accepted 28 September 2020)

ABSTRACT

With the exception of welding activities, it is forbidden to use electricity in shipyards, owing to safety concerns such as the possibility of fire, explosions, and short circuits. In this paper, an automatic chamfering machine using pneumatics is proposed for use in such environments. Customers specify their requirements and the machine derives the corresponding theoretical design conditions. The proposed machine was used to perform 3D modeling, and its suitability and performance were confirmed via cutting experiments of the manufactured device. Two types of sensors may be used in this system: contact and non-contact. In the case of the contact type, an end-stop switch that can recognize the end of the material is installed, and when the machine reaches the end of the material, the end-stop switch is operated to cut off the air pressure. In the non-contact type, four sensors were used: photonic, ultrasonic, metal detection, and encoder. The use of the four sensors was repeated 30 times, and the average error determined. Thus, the optimum sensor was identified.

Key Words : Chamfering Machine(면취 장치), Sensor(센서), Active Control(능동 제어), Mechanical Design(기계 설계), Pneumaticity (공압)

1. 서 론

2015년 이후 글로벌 경기 침체의 여파로 주춤했던 한국 조선 산업은 2018년 이후부터 업황이 개선됨에 따라 활기를 되찾고 있으며, 한국은 LNG를 비롯한 특수선을, 중국은 일반 벌크선 건조를 강점

으로 내세워 경쟁하고 있다. 조선업에 사용되는 철강재는 염분과 상시 접촉하므로, 이를 보호하기 위한 도장(Coating)은 필수 작업 요소에 해당된다. 도장의 품질은 철강재의 면취 수준에 따라 달라지며, 도장 불량은 배의 침몰(불량 도장 주위 캐비테이션 → 도장 손상 → 철강재 부식 → 강도 저하)로 이어질 수 있기 때문에 Performance Standard for Protective Coatings(이하 PSPC)이라는 규정으로 이를 엄격히 관리 중이다. 일반적으로 조선업에 공급되

Corresponding Author : chong@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3605, Fax: +82-55-275-0101

는 철강재는 수 m에 달하며, 규정상 모든 철강재에 대해 면취 작업이 수행돼야 한다. 이에 각 철강재마다 작업자가 배치되어 면취 작업을 수행하며, 면취 품질/작업 시간이 온전히 작업자의 숙련도에 의존되므로 효율적인 생산 관리를 기대하기 어렵다. 철강재의 면취가 지속되면 손목 부상과 같은 안전 사고와 더불어 인건비가 지속 지출되어, 이를 해결할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁷⁾. 예를 들어, 황중대 외는 제품의 형상 외곽에 따라 자동으로 면취를 수행하는 시스템을 제안하였고, 실험을 통해 그 성능을 평가하였다⁸⁾.

현재 공개된 자동 면취기의 종류는 크게 직사각형 형상 또는 파이프형 철강재를 면취하는데 사용된다. 두 형식 모두 전기로 동작하므로 전도체가 많은 조선소나 공장 등에서는 안전 사고의 가능성이 있다. 또한 직사각형 및 파이프 자동 면취기 모두 제어 단말기가 반드시 동반돼야 하므로, 휴대성 면에서 사용 가능한 환경이 제한적이다. 또한 가이드 레일 또는 파이프에 고정단을 설치한 뒤 동작해야하므로, 관리자의 작업 현황에 대한 수시 확인과 더불어 면취기의 휴대가 불가능하다.

이에 본 논문에서는 철강재의 자동 면취가 가능한 면취기와 그 센서 시스템을 제안하고자 한다. 본 면취기는 공압으로 동작하므로, 전기 누전 사고를 사전에 방지할 수 있으며, 전방에 위치한 센서 시스템으로 철강재의 끝단을 감지하여 장치의 능동 제어가 가능하다. 몸체는 사용자가 장치를 휴대할 수 있도록 하며, 이동 장치와 전자석으로 추가 레일이 없어도 안정적인 이동이 가능하도록 하였다. 그리고 사용 시 신속 설정이 가능하도록 휴대성 및 편의성에 중점을 두었고, 유공압 이론을 이용하여 목표 수치를 도출하였다. 센서는 비·접촉식으로 구별하여 각 방식에 해당하는 센서들을 선정, 성능 실험을 실시해 각 센서들의 성능을 평가하였다.

2. 관련 이론

2.1 공압 모터 요구 성능 도출

일반적으로 산업 현장에 적용되는 공압은 6 kgf/m²이며, 요구되는 절삭 최대 속도는 3 m/min 이

Table 1 Properties of carbon pipe

RPM (·10 ³)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cutting Thickness (mm/rev)	3	1.5	1	0.75	0.6	0.5	0.43	0.37	0.33	3

다. 이에 초기 입력 유량에서 그에 따른 에너지가 분배되어 이동 및 절삭에 필요한 동력이 공급돼야 한다. 이에 이상기체 방정식으로 목표 조건에 도달할 수 있는 공압 모터 조건을 선정하고자 한다.

최우선 고려 사항은 사용할 면취날의 두께이며, 각 RPM에 따른 허용 절삭 두께를 표 1에 정리하였다. 본 면취기에 적용될 절삭날의 허용 최대 절삭 두께는 0.5 mm이므로, 최소 6000 RPM이 요구되는 것을 확인할 수 있다. 산업계에서 사용되는 공인 노즐 규격인 3/8 in(0.0095 m)를 기준으로 기체 유량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$PV=GRT \quad (1)$$

여기서, G 는 공기 탱크 내 저장된 공기를 1분간 사용했을 때의 공기 질량(kg), P 는 공기 탱크 내 절대 압력(kgf/cm²), V 는 공기 탱크 내 공기 초기 질량(kg), R 은 가스상수(-), T 는 공기 탱크 내 공기의 절대 온도(K)를 의미한다.

G 의 경우 탱크 내의 압력이 지속 감소하고 있으므로, 1분간 사용된 공기의 질량(ΔQ)을 계산하려면 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta Q = \Delta Q / \rho \quad (2)$$

$$\Delta G = \frac{P_0 V}{RT} - \frac{P_1 V}{RT} = (P_0 - P_1) \times \frac{V}{RT} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 해당 온도에서의 공기의 밀도, P_0 는 공기 탱크의 초기 절대 압력으로 8 kgf/cm², P_1 은 1분간 사용 후의 공기 탱크 압력으로 6 kgf/cm², R 은 공기에 해당하는 29.87, V 는 탱크 부피인 0.024 m³, T 는 상온에 해당하는 293.16 K로 계산하면 다음과 같다.

$$\Delta G = 2 \cdot 10^4 \cdot \frac{0.024}{(29.87 \cdot 293.16)} = 0.054 \text{ kgf} \quad (4)$$

0.054 kgf의 도출에서 사용된 29.87의 가스 상수는 0 °C 기준의 값이므로, 20 °C에 맞춰 보정하면 사용된 공기의 질량은 다음과 같다.

$$\Delta Q = 0.054 / (1.293 \cdot (273.16/293.16)) \quad (5)$$

$$= 0.045 \text{ m}^3$$

(5) 식으로 도출된 공기의 질량을 기준으로 노즐에서 발생시킬 수 있는 속력은 다음과 같다.

$$v = \frac{0.045}{60\pi \left(\frac{0.0095}{2}\right)^2} = \frac{0.045}{0.00425} = 10.58 \text{ m/min} \quad (6)$$

이와 같은 수치는 공압 분배기에서 3:7로 배분하더라도 면취기에서 3 m/min의 이송속도를 구현할 수 있고, 나머지 유량을 절삭날 구동에 활용할 수 있다. 이에 최대 허용 유량은 0.00315 m³에서, 6000 RPM의 회전수를 가지는 공압 모터를 면취기에 적용한다.

2.2 강제 끝단 감지 센서

면취기에 적용할 수 있는 센서의 종류 (비)접촉식으로 나눌 수 있다. 먼저 접촉식은 그림 1과 같이 면취기 하단에 기계식 밸브를 장착하고, 소재가 탐지되지 않을 경우, 공압 공급을 차단하여 면취기의 과전진을 방지한다. 이와 같은 방식은 공압 공급 중에도 바다면과의 미접촉 또는 장치가 불안정하게 위치할 경우 동작하지 않으므로, 안전장치의 역할을 병행할 수 있다.

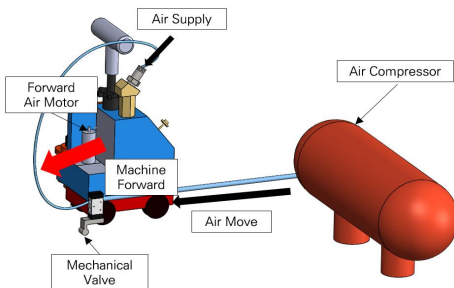


Fig. 1 Contact sensor of the chamfering device

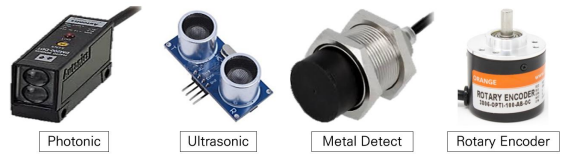


Fig. 2 Non-contact sensors

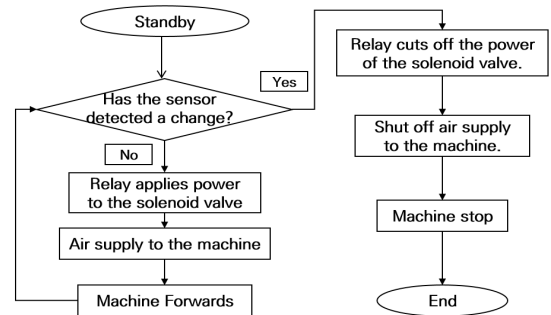


Fig. 3 Algorithm of non-contact sensors

비접촉식은 그림 2와 같이 센서를 사용하여 면취기 전진 방향의 소재 유무를 판별한다. 강제 끝단이 감지되지 않을 시에는 솔레노이드 밸브가 동작하여 유입 공기를 차단하고 면취기의 작동이 멈추게 된다. 비접촉식 센서에는 초음파의 반사를 이용한 초음파, 전자기 유도를 이용한 금속감지, 적외선을 발사하는 포토 센서와 더불어, 끝단이 없는 경우에 회전 감지가 가능한 로터리 엔코더 등 네 가지 타입을 고려할 수 있다. 그림 3과 같이 금속 감지 센서를 제외한 나머지 센서는 코딩으로 각각의 센싱 거리를 지정해주고, 기준 거리를 벗어났을 때 솔레노이드 밸브를 폐쇄하도록 한다. 그리고 엔코더는 회전수에 따른 전진 거리를 계산하여, 지정한 거리만큼 전진 후 공기 유입 밸브가 차단되도록 하여 능동 정지 기능을 구현한다.

3. 설계 및 제작

본 면취기는 공압으로 동작하므로, 출력 유지를 위한 공기 누수 방지 및 유량 제한이 중요하다. 이에 얼라이먼트, 기밀성, 구동 효율 확보를 위해, 몸체 소재는 알루미늄으로 선정하였다. 또한 유량 공급 및 전진 스위치를 따로 배치하여, 돌발 전진 사

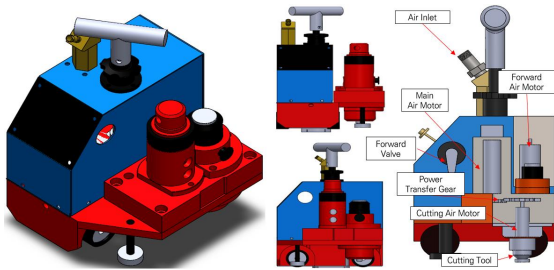


Fig. 4 3d modeling of the chamfering machine

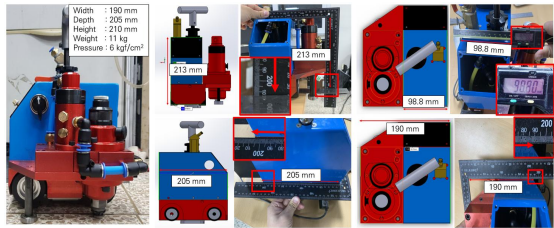


Fig. 5 Experimental model

고를 방지하고자 하였다. 면취기와 가공물의 고정 은 면취기 안정성 확보에서 필수 사항이며, 수직, 수평 방향 모두 면취가 가능해야 한다. 이를 위해서는 안정적인 고정, 마찰 최소화, 빠른 고정 해제 등이 요구된다. 이에 스위치식 자석을 면취기의 하단에 부착하였고, 물리적 장치를 최소화하고 필요 시에만 사용할 수 있도록 하였다.

면취기 이송을 위한 이송 장치의 경우, 대표적으로 바퀴와 캐터필러를 고려할 수 있다. 캐터필러는 회전 축과 벨트의 조합으로 물체를 이송하므로, 접촉면 확보가 안정적이고 표면이 고르지 않더라도 안정적 주행이 가능하다. 그러나 필요 부품이 많아 유지보수에서 단점이 존재하고, 바퀴의 경우 접촉면이 캐터필러보다 적으나, 그에 따른 구름 저항 또한 감소하여 구동 에너지의 최소화가 가능하다. 또한 부품이 상대적으로 간단하므로 유지보수에 유리함. 이러한 조건을 고려했을 때, 부품 조달이 어려운 조선소 환경과 유지 보수 시간의 최소화를 위해 바퀴가 이송 장치로 결정하였다.

이와 같은 설계 조건을 기초로 그림 4와 같이 3D 도면이 작성되었으며, 간섭이 발생하지 않음을 확인하였다. 이 도면을 기초로 실험 모델이 제작되었으며, 공압 모터는 기성품이 존재하지않아 주문

제작으로 적용하였다. 그림 5와 같이 설계된 치수 대로 실험 모델이 제작된 것을 확인하였다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 조건

제작된 자동 면취기로 실제 철판에서의 절삭 작업 여부를 확인하였고, 평판에서의 작업과 수직 방향 작업 모두 진행하고 절삭 여부를 평가하였다. 면취 작업 여부가 확인되면, 능동 정지 센싱 시스템의 구동 실험을 실시한다. 실험 방법은 그림 6과 같으며, 면취기 커팅날 쪽 와셔를 시작점으로 설정, 정지 위치까지의 거리를 21 cm으로 고정하였다. 그리고 면취기 이동 후 정지 시의 거리를 측정하여 기준 거리 21 cm와 비교하였다. 각 센서 별로

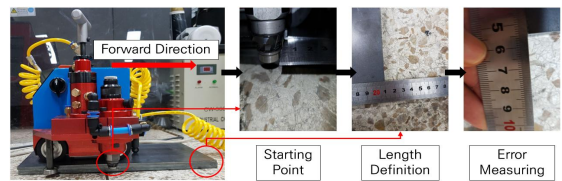


Fig. 6 Sensor experimental environment

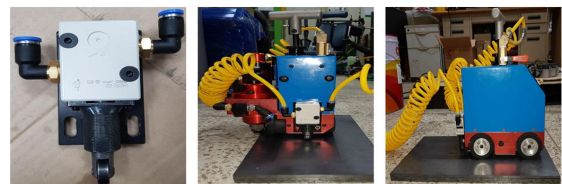


Fig. 7 Contact sensor of the machine

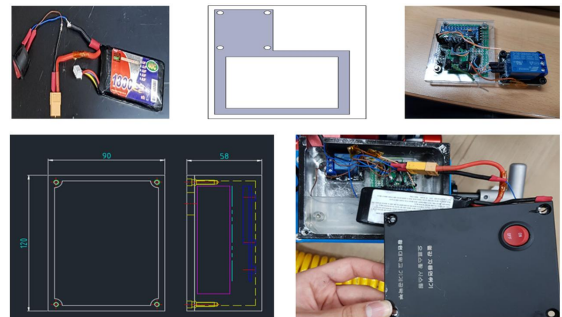


Fig. 8 Control box for experiment

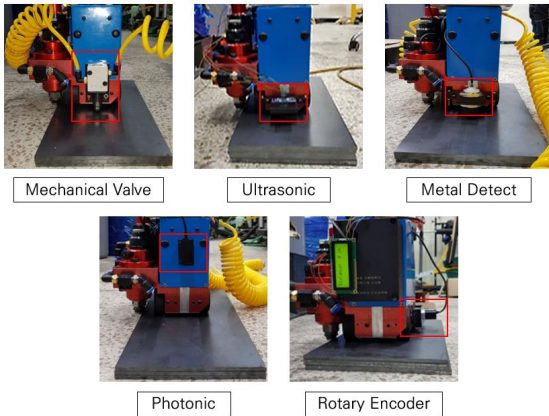


Fig. 9 Experimental model according to sensors

30회 반복 실험을 진행하였으며, 오차 평균을 구하여 각 센서의 성능을 평가하였다.

위와는 별개로 엔코더 자동정지 시스템의 경우, 판재와는 상관없이 설정된 거리만큼 전진해야 하므로, 10, 20, 30 cm의 거리를 설정하였다. 그 후 각각 10번의 실험을 진행하고, 면취기를 전진시켜 목표 거리에서 멈추는지에 대한 여부를 확인하였다.

접촉식 센서 시스템은 그림 7과 같이 기계식 에어 차단 밸브를 사용하였고, 압축기의 압력에 맞도록 허용압력은 8kgf/cm^2 이하로 선정하였다. 면취기의 타이머보다 먼저 판재를 인식해야 하므로, 그림 21과 같이 전방부 바퀴의 앞쪽에 고정하여 인식되도록 하였다.

비접촉식 센서 시스템은 전자식으로 운용되므로 제어부 구성은 그림 8과 같다. 전력 공급을 위해 배터리를 사용하였으며, 회로를 전장 박스 내부에 설치하여 외부 환경으로부터의 전자기 영향을 배제하였다. 이에 센서 신호가 On/Off 되었을 경우, 솔레노이드 밸브를 제어하기 위해 릴레이를 사용하였고, 기타 기판은 부피 최소화를 위해 모든 칩셋 및 저항을 PCB 위에 구성하였다. 누전으로 인한 기계 파손 및 인명 피해를 방지하기 위해 기판의 뒷면은 캡톤 테이프를 절연한 뒤, 아크릴 판으로 2차 밀봉하였고, 프로토타입 테스트를 위해 기성품 알루미늄 전장 박스를 사용하였다. 모든 센서 및 엔코더는 장착용 브라켓을 제작하였으며, 절연 및 가공의 용이성을 위해 아크릴을 주 소재로 적용하였다. 또

한 공급되는 공압을 제어할 솔레노이드 밸브는 최대 15kgf/cm^2 을 허용할 수 있는 모델을 선정하였다. 각 방식의 센서가 장착된 실험 모델은 그림 9와 같다.

4.2 실험 결과

절삭 여부 실험에서는 그림 10과 같이 수직 및 수평에서 면취 작업이 가능한 것을 확인하였다.

접촉식의 경우, 30회 반복 실험결과, 최소, 최대, 평균 오차는 각각 0.01, 0.06, 0.022 cm로 확인되었다. 기본적으로 접촉 감지가 기본이므로, 접촉면에서 밸브 스위치가 작동되는 시간까지의 오차가 발생하는 특징을 보였다.

포토 센서의 경우, 최소, 최대, 평균 오차는 각각 0.01, 0.20, 0.07 cm로 확인되었다. 최소 오차는 접촉식에 비해 낮았으나, 반복 실험 시 오차의 편차가 상대적으로 크며, 평균 오차 또한 접촉식 정지 시스템보다 높은 것을 확인하였다. 그리고 센서의 감지 원리가 확산 반사형이므로, 철판의 끝단 인식 시 인식 거리의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 초음파 센서의 경우, 최소, 최대, 평균 오차는 각

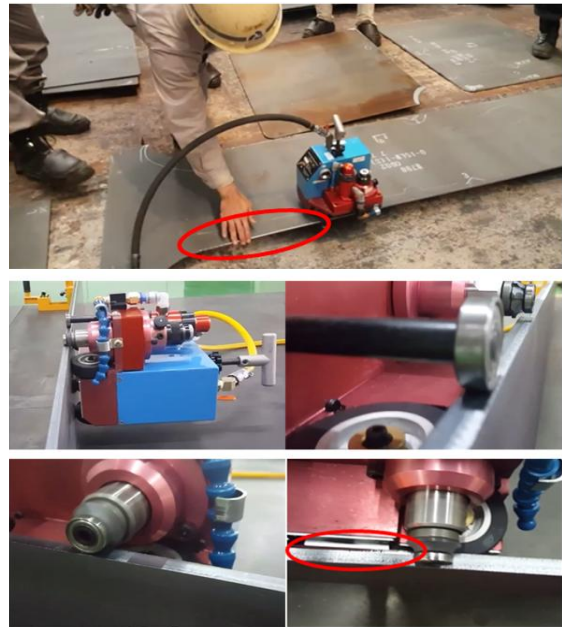


Fig. 10 Normal and vertical chamfering experiment

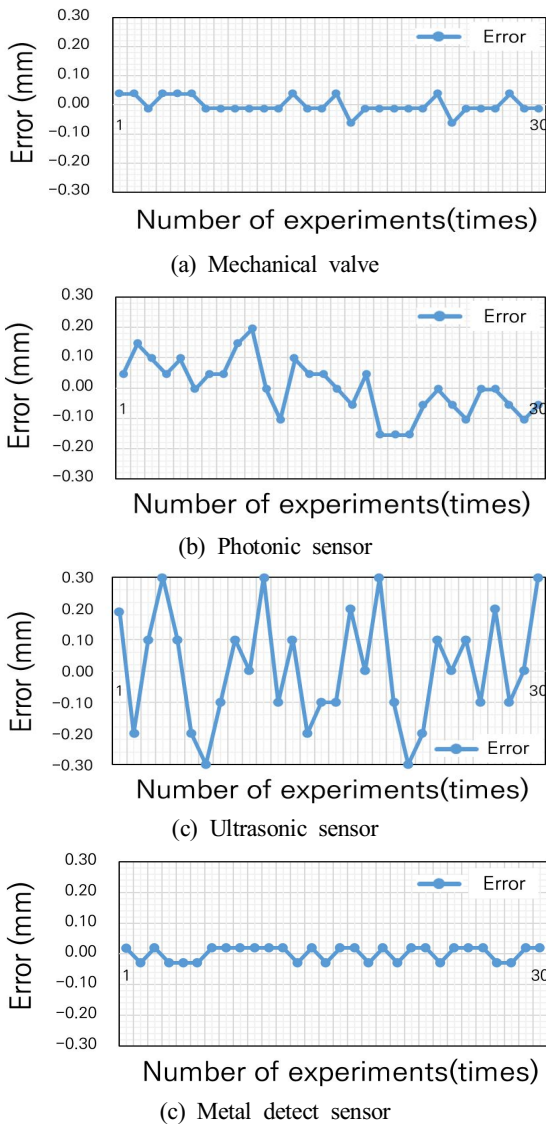


Fig. 11 Experimental result of non-contact sensors

각 0.01 이하, 0.30 cm, 0.15 cm로 확인되었다. 다른 센서와 비교하였을 때, 큰 평균 오차 및 각 횟수별 편차가 두드러진 것을 확인하였다.

금속 감지 센서의 경우, 최소, 최대, 평균 오차는 각각 0.02, 0.03, 0.06 cm 로 확인되었다. 사용된 센서 중 횟수별 편차가 가장 적으며, 기준값 대비 가장 낮은 평균 오차율을 보였다. 철강 판재의 경우 투자율이 높으므로 인식 오류가 발생하지 않았고,

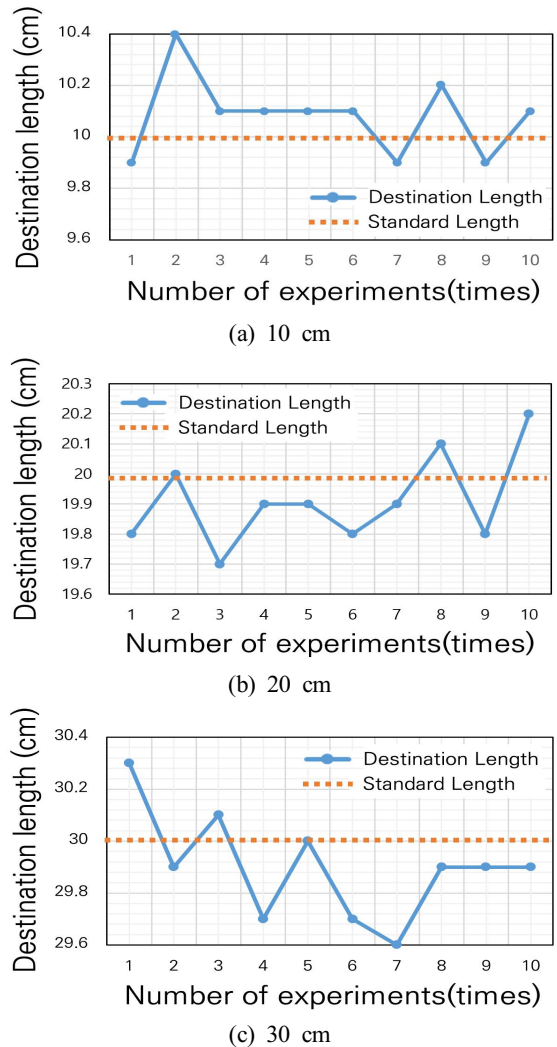


Fig. 12 Experimental result of rotary encoder

확산형이 아닌 전류 검출 방식이므로, 철판의 끝단에서 일정하게 멈추는 것이 확인되었다. 이는 초음파 센서의 최소 인식 시간, 즉 발산된 음파가 되돌아오기까지의 시간이 기인한다.

엔코더의 경우, 그림 11과 같이 설정 거리 10 cm 에서 평균 이동거리는 10.08 cm, 설정 거리와의 오차율은 0.8%, 20 cm 에서 평균 이동거리는 19.9 cm, 오차율은 1.0%, 30 cm에서의 평균 이동거리는 29.9 cm, 오차율은 1.0 %로 확인되었다. 실험에 적용된 엔코더는 200 pulse/rev의 분해능을 가지므로,

최소 인식 각도는 가 1.8 °이다. 이에 그 이하의 각도 변화에선 오차가 발생할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 공압으로 강제의 면취가 가능한 자동 면취기와 능동 제어를 위한 센서 시스템을 제안하였다. 조전소는 전기로 인한 화재, 폭발, 누전 등의 문제로 인하여 용접 이외의 작업 시 전기를 동력으로 하는 것을 금하고 있으므로, 공압 면취기로 극복 가능하다. 이에 면취기에 적용될 공압 모터의 성능 도출을 위해 이상 기체 방정식을 이용하여 필요 유량 및 최소 회전수를 도출하였다.

제작된 자동 면취기의 절삭 실험으로 기계의 적합성 및 성능을 확인하였고, 능동 정지의 기능을 구현하고자, 비·접촉식의 두 가지 방법으로 시스템을 구성하였다. 그러나 접촉식의 경우, 항상 소재에 닿아있기 때문에 스위치가 닳아버리는 문제점이 발생하였고, 이에 비접촉 방식으로 센서를 이용하여 끝단을 인식하도록 하였다.

비접촉 방식은 포토, 초음파, 금속 감지 센서와 더불어 엔코더 총 4가지의 센서를 사용하였다. 포토, 초음파, 금속 감지 센서의 경우 모두 소재의 끝단을 인식하여 공압을 차단하는 방식이나, 엔코더는 바퀴의 회전수를 이동거리로 환산하여, 작업자가 원하는 거리 만큼 이동 후 정지하도록 하였다. 네 가지 센서 모두 30회 반복 실험을 진행하였으며, 각각의 평균 오차를 측정하여 각 센서의 성능을 계산하였다. 이에 금속 탐지 센서가 최적의 성능을 보인 것으로 확인되었으며, 엔코더는 각 거리 별로 평균 1%의 오차율을 보였다.

후 기

“이 논문은 2019~2020년도 창원대학교 자율연구 과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임”

REFERENCES

1. Koo, J. H., Kim, I. H., and Hur, N. S., “A

Study on Development of High Speed Deburring Machine”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 5, pp. 116-121, 2013.

2. Kim, C., Choi, Y. H., Sho, B. H., and Kim, C. H., “A Development of High-Precision Chamfering Tool Set”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 117-122, 2015.

3. Choi, B. R., Hwang, K. B., and Bae, K. Y., “Analysis on Cutting Force of Tool in Gear Chamfering Process”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 1, pp. 52-62, 2013.

4. Cheon, K. H., and Kim, H. J., “An Experimental Study on the Deburring Characteristics according to rpm Change of Deburring Wheel”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 5, pp. 103-110, 2018.

5. Bae, J. K., Park, H. Y., Kwon, B. C., and Ko, S. L., “Determination of Cutting Conditions for an Efficient Deburring Process Using a New Deburring Tool”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 109-117, 2016.

6. Yeo, W. S., Lee, C. S., Chae, S. S., and Lee, J. C., “Deburring using Magnetic Abrasive Machining”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5, No. 1, pp. 13-18, 2006.

7. Kim, S. M., Jung, Y. G., and Cho, S. L., “A Basic Research for the Development of Generalized Shape Guided Automatic Deburring Machine”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 104-109, 2012.

8. Hwang, J. D., Kim, J. S., and Jung, Y. G., “The Development of Shape Guided Automatic Deburring Machine for Mold Products”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 1, pp. 16-22, 2011.