

반복학습제어기를 이용한 자석식 자동 파이프 절단 로봇의 제어

이성환*, 김국환, 임성수, 이순걸(경희대 기계공학과)

Control of Automatic Pipe Cutting Robot with Magnet Binder Using Learning Controller

Sung-Whan Lee*, Gook-Hwan Kim, Sungsoo Rhim, Soon-Geul Lee
(Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University)

ABSTRACT

Tracking control of an automatic pipe cutting robot (APCROMB) is studied. Using magnetic force APCROMB, which is designed and developed in Kyung Hee University, binds itself to the pipe and executes unmanned cutting process. The gravity effect on the movement of APCROMB varies as it rotates around the cylindrical pipe laid in the gravitational field. To maintain a constant velocity and consistent cutting performance against the varying gravitational effect, the authors adopt a multi-rate repetitive learning controller (MRLC), which learns the required effort to cancel the repetitive tracking errors caused by nonlinear effect. In addition to the varying gravity effect other types of nonlinear disturbances including backlash in the driving system and the slip between the wheels of APCROMB and the pipe also cause degradation in the cutting process. In order to identify those nonlinear disturbances the position estimation based on the encoder attached at the motor is not good enough. To identify the absolute angular position of APCROMB the authors propose the angular position estimation based on the signals from a MEMS-type two-axis accelerometer mounted on APCROMB. The tracking performances of APCROMB with a MRLC using the encoder-based position estimation is experimentally measured and results are shown. Also the difference between the encoder-based angular displacement measurement and the accelerometer-based angular displacement measurement is included..

Key Words : Learning Control(학습제어), Pipe Cutting Robot(파이프 절단 로봇), Angular Position Estimation(각변위 추정), Slip(미끄럼)

1. 서론

파이프 절단과 용접은 많은 산업에서 가장 일반적인 작업이지만 쾌적하지 못한 작업 환경으로 인해 작업자들이 기피하는 경향이 있다. 감소 추세에 있는 노동자를 대체하고, 더 중요한 제품의 품질을 향상시키기 위해서 많은 영역에서 장비의 자동화가 시도 되어 왔으며 많은 자동화 장비가 개발, 구현 되어 왔다[1]. 원형 파이프용의 절단(용접) 기계는 2차원 평면과는 다른 원통형 파이프의 원주 방향으로의 움직임을 필요로 하며 중력을 이기고 파이프에 부착되어야 한다[2]. 파이프 절단 작업을 위해서 많은 종류의 자동화 장비들이 고안되고 구현되어

왔지만 그들 대부분은 장비를 파이프에 부착하기 위하여 추가적인 지그나, 체인, 레일 등의 사용을 요구한다. 파이프에 장비를 탈·부착하기 위하여 추가적인 지그를 사용하는 것은 매우 번거로운 뿐만 아니라 절단장비의 사용 범위를 제한한다.

최근 경희대학교에서는 APCROMB(Automatic Pipe Cutting Robot with Magnet Binder)이라고 불리는 영구 자석을 이용한 바퀴구동 방식의 자동 파이프 절단 로봇을 개발하였다.[3]. APCROMB 는 장비 하부에 설치된 영구자석을 사용하여 파이프의 표면에 부착되며 무인 절단 작업을 수행한다. APCROMB 는 추가적인 지그를 사용하는 기존의 장비와 비교하여 장비의 탈·부착 시간을 상당히 줄여 줄 뿐만 아니

라 파이프의 모양, 크기가 다른 파이프의 절단작업마다 별도의 다른 지그를 필요로 하지 않는다. 큰 파이프의 절단 작업 시에는 추가적인 지그를 사용하지 않는 점이 더더욱 많은 이점을 갖게된다.

APCROMB 가 절단 작업을 하며 중력장에 수직으로 놓여진 원통형 파이프 주위를 회전하는 동안 APCROMB 의 구동력에 작용하는 중력의 영향은 그 위치에 따라 변화하며, 이로 인한 APCROMB 의 속도 변화는 파이프의 절단 품질을 저하시키는 원인이 된다. 그러나 변화하는 중력의 영향은 APCROMB 의 성능을 저하시키는 유일한 외란은 아니며 구동 시스템의 백래쉬, APCROMB 구동 바퀴와 파이프면 사이의 미끄러짐을 포함한 비선형 외란 또한 절단 작업의 결과를 나쁘게 한다

이 논문에 보인 바와 같이 APCROMB 추종 오차(tracking error)는 매우 반복적인 특성을 보인다. APCROMB 의 안정된 절단 성능을 지키기 위해 본 논문은 이러한 반복 특성을 고려하여 다중속도 반복 학습제어기(MRLC: multi-rate repetitive learning controller)의 사용을 제안한다. MRLC 는 주기성을 갖는 명령 궤적(periodic desired trajectory)의 완벽한 추종을 이루기 위하여 요구되는 제어 입력을 경험을 통하여 학습한다. 시스템 모델을 구성하여 미지의 시스템 파라미터들을 찾아가는 전형적인 적응 제어 설계와는 달리 반복 학습제어기는 플랜트의 제어에 관한 매우 적은 양의 사전지식을 요구한다 [4][5].

본 논문에서는 두 가지 제어기, 즉 1) 엔코더 기반의 PD 제어기, 2) 엔코더 기반의 PD 제어기가 결합된 MRLC 를 실험적으로 비교하고자 한다. 또한 엔코더에 의해 측정될 수 없는 여타의 비선형요소(바퀴에서의 미끄러짐과 체인, 감속기 등의 백래쉬)의 영향을 파악하기 위해 MEMS 형 가속도계를 이용하여 각변위를 추정하고, 이를 엔코더에 의한

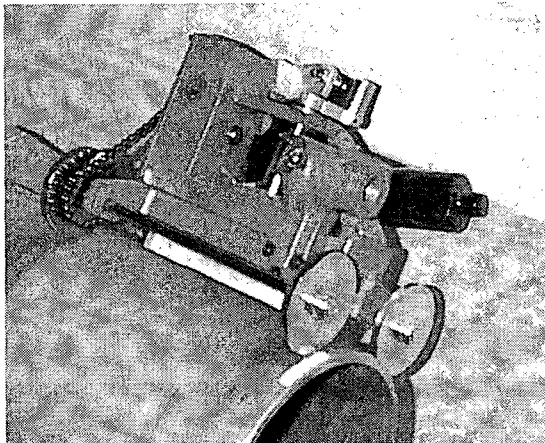


Fig. 1 Picture of APCROMB.

각변위 측정치와 비교하였다.

본 논문에서는 먼저 APCROMB 의 구조와 동역학을 먼저 설명한 후 다중 속도 반복 학습 제어 이론을 설명을 한다. 실험결과는 APCROMB 의 추종 성능 향상에 있어 MRLC 의 효용성과 가속도계기반의 위치 추정(estimation)의 필요성을 입증한다.

2. 장비구성

실제로 구현된 APCROMB 의 사진과 개념도를 그림 1 과 2 에 나타내었다. APCROMB 는 좁은 폭과 높이를 가지는 작업공간에 손 쉽게 설치하기 위하여 무게를 최소화하여 설계 되었다. APCROMB 는 하부에 영구자석이 들어 있는 자석실을 갖고 있다. 사용자는 로봇의 상부에 있는 조정핸들을 사용하여 자석을 위, 아래로 움직일 수 있고 자석과 파이프 면 사이의 간격을 조정할 수 있다. 자력은 자석과 파이프 면 사이의 거리에 따라서 변한다. 자석과 파이프 사이의 간격에 따른 자력은 표 1 과 같이 측정 되었다. APCROMB 는 바퀴를 구동하기 위하여 DC 모터와 웜 감속 기어열을 사용한다. 4 개의 동일한 바퀴는 감속 기어열로부터 토크를 전달하는 체인 메커니즘에 의하여 구동된다. APCROMB 에 사용되는 DC 모터는 완전히 밀봉되어 있어 산업 현장에서 오염의 우려 없이 사용할 수 있다. 엔코더는 APCROMB 의 상대적인 각변위를 실시간으로 얻기 위하여 모터에 직접 부착되어 있다.

그림 3 은 파이프의 반지름 R , APCROMB 의 질량 m , 바퀴의 반지름 r , 구동시스템에 의하여 바퀴에 가해지는 토크 τ , 자력에 의한 부착력이 F_{mag} , 파이프 위의 APCROMB 위치에 따른 마찰력 F_u 사

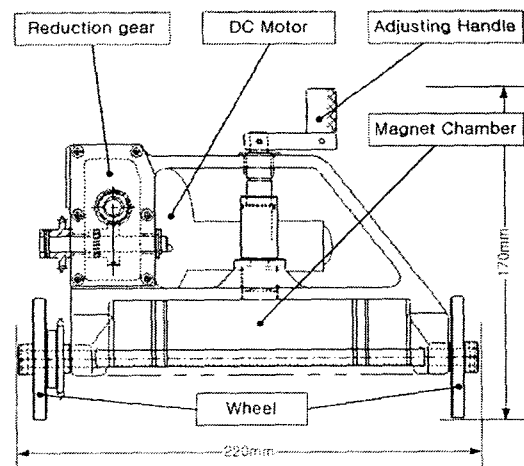


Fig. 2 Schematic diagram of APCROMB

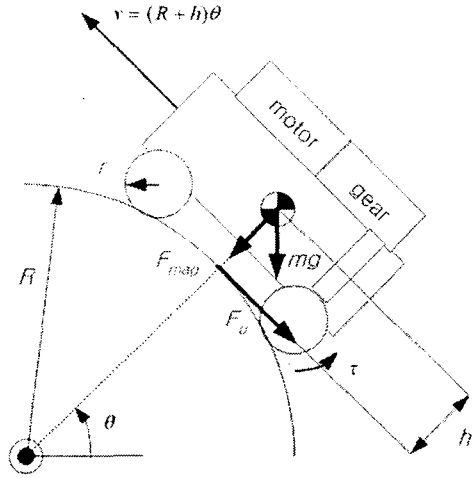


Fig. 3 Free-body diagram of APCROMB on pipe.

이의 관계를 표시한 APCROMB의 자유물체도이며, 식(1)과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\mu(F_{mag} + mg \sin \theta) - mg \cos \theta = m(R+h)\ddot{\theta} \quad (1)$$

모터 동역학과 감속 기어열 동역학을 고려하면 입력인 모터 토크 T 와 APCROMB의 각변위 θ 사이의 관계는 식(2)로 나타낼 수 있다

여기서 J_m 은 모터의 관성, n 은 모터의 감속비,

$$\left[J_m n \beta + \frac{J' \beta}{n} + \frac{rm}{n}(R+h) \right] \ddot{\theta} + \left(B_m n \beta + \frac{B' \beta}{n} \right) \dot{\theta} = T - \frac{rmg}{n} \cos \theta \quad (2)$$

J' 은 감속기어, 체인을 포함한 동력 전달 시스템과 절단기의 관성에 의하여 발생된 관성 효과의 합성 결과, β 는 R 과 r 사이의 비(R/r), B 은 모터의 감쇠, B' 은 토크 전달에서의 감쇠 그리고 T 는 모터 토크이다. 식(2)에서 위치에 따른 움직임에 미치는 중력의 영향을 나타내었다. 식(2)는 관성 J 의 모멘트와 같은 비틀림 감쇠 B 를 사용하여 식(3)으로 정리할 수 있다

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = T - T_d \quad (3)$$

위 식에서 $T = K_m \dot{i}_a$, $T_d = (rmg/n) \cos \theta$, $B = B_m n \beta + B' \beta / n$, $J = J_m n \beta + J' \beta / n + rm(R+h)/n$, 그리고 K_m 은 모터 상수, \dot{i}_a 는 현재 모터에 공급되는 전류이다. 실험으로부터 얻은 시스템의 파라미터 값을 표 2에 나타내었다.

3. 제어시스템

반복 학습 제어기는 주기적인 궤적(periodic trajectory)을 정확하게 추종하는데 효과적이며, 이론

Table 1. Measured Magnetic Forces for Different Gap Distance.

Gap(mm)	2	4	6	8	10
Force(N)	870.2	807.5	744.8	689.9	639.9

Table 2. Parameters of Estimated Equivalent System

Parameter	Value	Unit
J	100	$N \cdot m \cdot sec^2$
B	400	$N \cdot m \cdot sec$

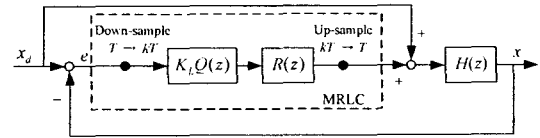


Fig. 4 Multi-rate repetitive learning controller.

적으로 반복 학습 제어기는 비선형성이 존재하는 시스템의 경우에도 완벽한 추종을 이룰 수 있다. 본 논문은 이산 시간에서 정확한 APCROMB의 속도제어 작업을 위하여 James 등에 의하여 개발된 다중 속도 반복 학습 제어기(Multi-rate Repetitive Learning Controller, MRCL)를 기존의 PD 피드백 제어기와 통합하여 제어 시스템을 구현하였다[7].

이산 반복 학습 제어기의 매우 높은 비율의 샘플링은 예상치 못한 고주파 특성을 나타내며, 안정성이 낮고, 과도한 메모리 저장 비용을 초래한다. MRCL은 이러한 내재된 문제를 피하기 위하여 전체 시스템의 샘플 비율을 낮출 필요 없이 상대적으로 낮은 속도의 샘플링을 할 수 있도록 설계되었다.

그림 4에서 T 는 제어계의 샘플 주기이며, 그림은 k 가 1보다 큰 정수인 경우 일반적인 형태의 MRCL의 블록 선도를 보여준다. Down-sampling은 빠른 샘플링 속도에서 보다 낮은 샘플링 속도로의 전환을 나타내고 up-sampling은 낮은 샘플링 속도에서 높은 샘플링으로의 전환을 나타낸다. 우리는 선형가중평균(linear weighted average)을 이용하여 down-sampling 하였고, 선형보간법(linear interpolation)을 이용하여 up-sampling 하였다.

MRCL은 $K_L Q(z)R(z)$ 의 형태를 갖는데, 여기서 양수 K_L 은 학습 명령 이득, $Q(z)$ 는 앞섬 보상기(lead compensator) 그리고 $R(z) = 1/(z^N - 1)$ 이다. NkT 가 추종하기를 원하는 궤적의 한 주기 일 때, $R(z)$ 은 NkT 만큼의 시간지연을 갖는 정제된 뒤먹임제어기이다. K_L 과 $Q(z)$ 는 다중속도 반복 학습 제어기 안정성 기준을 만족 하도록 결정된다[7][8].

$R(z)$ 은 식(4)와 같이 N 개의 1차 전달 함수의 합으로 표현할 수 있는데,

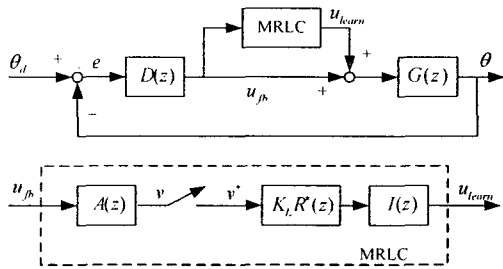


Fig. 5 Block-diagram of actual control system implemented.

$$R(z) = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{z - z_i} \quad (4)$$

여기서, a_i 는 i 번째 미확정계수 이고 $z_i = e^{j2\pi/N}$ 는 pole의 위치이다. $2\pi/N$ 인 z_i 의 주파수는 기본 주파수라 부르며 나머지 $N-1$ 개의 주파수들은 기본주파수의 정수배로, 하모닉 주파수라 불린다. 반복 학습 제어는 원하는 궤적의 특정 주파수의 피드백 루프에서 무한대의 명령을 갖고, 각 특정주파수에서 추종오차가 0 으로 감소하도록 한다. 본 논문에서 사용된 실제 제어 시스템을 나타낸 그림 5의 블록선도를 고려하여 보자. 그림 4에 보인 시스템과 등가 시스템인 점을 주목하면 $A(z)$ 는 선형 가중 평균 필터, *는 down-sampling을 나타내고, K_L 은 학습 명령, $R^*(z) = 1/(z^N - 1)$, $I(z)$ 은 선형 보간 (up-sampling) 필터, $D(z)$ 는 일반적인 PD 제어기 그리고 $G(z)$ 는 APCROMB의 전달 함수를 나타낸다.

4. 실험 및 결과

실시간 이산 제어 시스템 실험은 MATLAB의 Simulink xPC Target을 사용하여 수행되었다. 그림 6은 실험장비의 구성도를 보여준다. Target 컴퓨터는 단지 실시간 제어만을 다루고, Host 컴퓨터는 TCP/IP 연결을 이용하여 실시간 프로그램을 Target PC로 전송하고 또한 Target PC로부터 실행된 데이터를 얻는다. 엔코더는 구동 모터에 연결되어 Target PC 상의 제어계에 모터의 회전 정보를 보낸다. APCROMB에 부착된 엔코더의 분해능은 감속기의 영향을 포함하여 7.42×10^{-6} rad/pulse 값을 갖는다. Target PC에서 계산된 제어 명령은 PWM 신호 형태로 모터 앰프(amp)로 보내진다. 모터 앰프는 +/- 5volt의 입력 범위를 갖고 있다. MEMS형 2축 가속도 센서(AnalogDevice ADXL chip)는

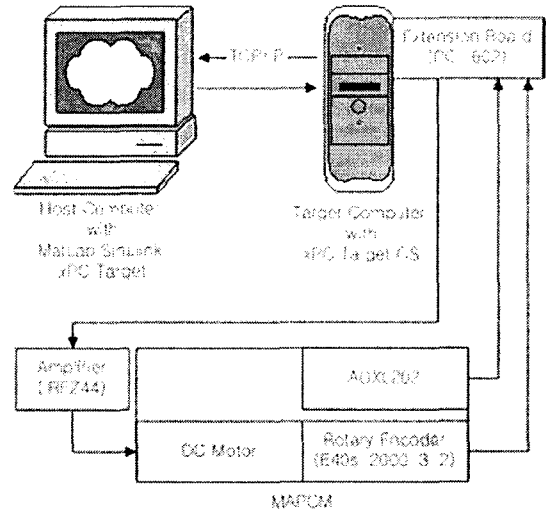


Fig. 6 Configuration of real-time control system implemented.

APCROMB에 부착되며 가속도계는 PWM 신호 형태로 APCROMB에 작용하는 중력의 영향을 Target PC 상의 제어계로 공급한다.

본 논문에서는 다음 2 종류의 제어 실험을 수행하고 그 결과를 제시한다.

- 1) 엔코더 기반의 위치 추정을 사용한 PD 피드백 제어.
- 2) 엔코더 기반의 위치 추정을 사용한 PD와 결합된 MRLC 제어

실험에 사용된 제어 시스템의 샘플링 속도는 200Hz이고 MRLC의 down-sampling 비율은 5로 설정하였다.

그림 7은 실험에 사용한 주기적 목표 궤적을 보여준다. 사다리꼴 속도 프로파일형태의 궤적은 중간에 일정 길이의 정속운행구간을 포함한다. 최대 각변위의 크기는 π rad이며 주기는 130sec이다.

그림 8은 첫 번째 실험, 즉 엔코더 기반의 위치 추정을 사용한 PD 제어기 실험에서의 APCROMB 응답을 보여준다. 그래프 (a)는 엔코더에 의해 측정된 각변위를 보여주며, (b)는 추종 오차, (c)는 계산된 제어 명령을 보여준다. 이 실험결과들은 추종 오차와 제어 명령이 매우 강한 주기성을 갖고 있음을 보여준다.

그림 9는 MRLC가 엔코더 기반의 위치 추정을 이용한 PD 제어기와 함께 사용된 두 번째 제어기 실험에서 APCROMB의 응답을 보여준다. 그래프 (a)는 각변위 오차를 보여주며 (b)는 MRLC에 의하여 학습된 feed-forward 제어 입력을 보여주며, (c)는 피드백 제어 명령을 보여준다. 첫 번째 운전 주기 동안에는 오직 피드백 PD 제어기만이

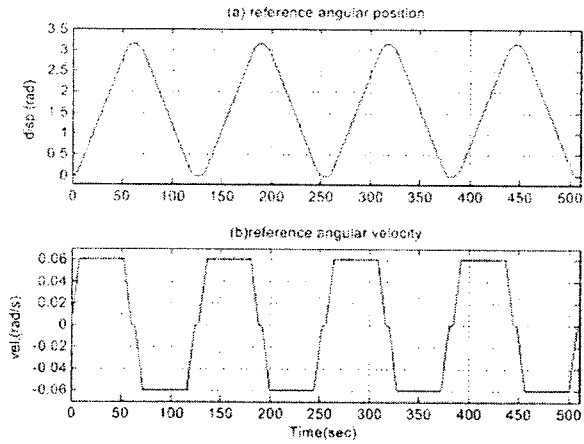


Fig. 7 Periodic reference trajectory: (a) desired angular position and (b) desired angular velocity.

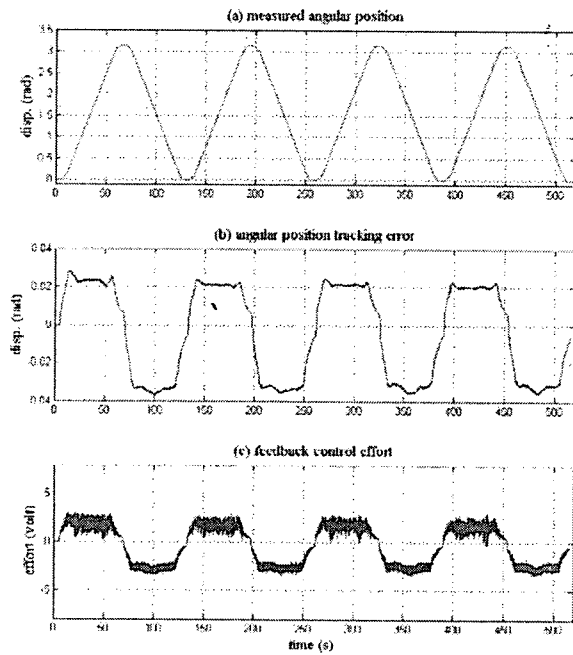


Fig. 8 Measured responses of APCROMB with a conventional PD controller: (a) measured angular position, (b) angular position tracking error, and (c) calculated feedback control effort.

APCROMB의 제어를 수행하고 MRLC는 제어 과정에서 관측된 추종 오차로부터, 추종오차를 줄이는데 필요한 feed-forward 제어 입력을 학습한다. 학습 제어기는 두 번째 주기가 시작되자마자 첫 번째 주기에서 학습된 feed-forward 제어 입력을 적용한다. MRLC의 작용에 의해 두번째 주기부터 추종 오차는 거의 잡음 신호 수준으로 급격히 감소한다. 반

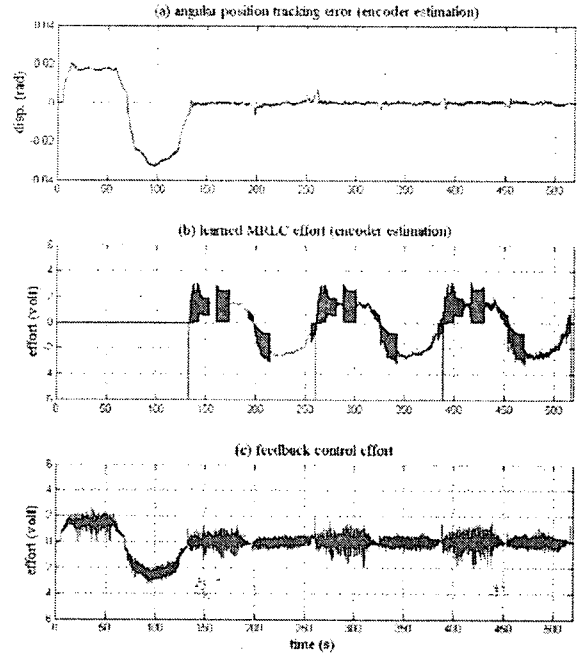


Fig. 9 Measured response of APCROMB with a PD controller and a MRLC using encoder estimation: (a) measured tracking error, (b) learned MRLC effort, and (c) feedback control effort.

복적인 오차는 MRLC 입력값에 의하여 제거되었고 피드백 제어는 오직 반복적이지 않은 외란에 응답한다.

비록 MRLC가 엔코더에 의해 관측되는 추종 오차를 0으로 만들었지만 APCROMB가 반복적으로 움직일 때마다, 초기 시작 위치로부터 점차 멀어지는 drift 현상이 실험에서 관측되었다. 이것은 바퀴와 파이프면 사이에서 발생된 미끄러짐의 누적으로 설명될 수 있는데, 엔코더가 관찰하지 못하는 외란이나 바퀴의 미끄러움을 파악하기 위하여 우리는 APCROMB에 정가속도를 측정할 수 있는 MEMS-형 2축 가속도계를 설치하였다. 가속도계의 각 축에서 정가속도의 측정 민감도는 축이 중력방향과 수직인 경우 최대값을 가지며, 중력방향과 수평을 이루게 되면 매우 둔감해진다. 2축가속도계에서 서로 수직인 두 축의 민감도는 $\pi/2$ 의 위상차를 갖기 때문에 각변위 추정의 민감도를 증가시키기 위하여 선형적으로 결합된 상호 의존적인 두 가속도 신호를 이용하여 보다 정확한 APCROMB의 각변위를 측정하도록 하였다. 각변위를 유도할 때, 우리는 원심력의 영향을 무시하였고 두 번째로 저속에서의 움직임을 고려하여 각변위를 유도하였다.

그림 10에서 (a)는 각각 엔코더와 ADXL 가속도계로부터 계산된 두 개의 서로 다른 APCROMB의

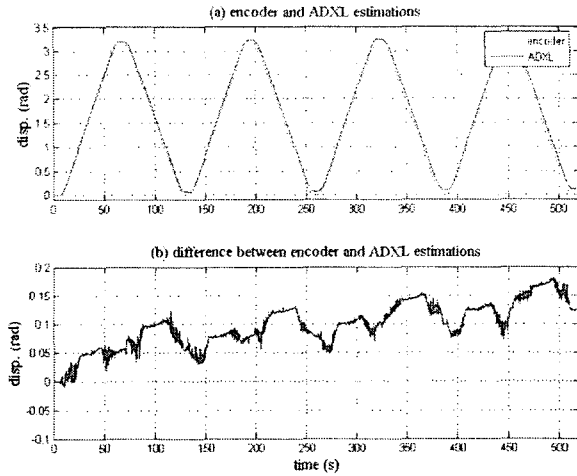


Fig. 10 Angular position estimations: (a) encoder estimation and ADXL estimation (b) difference between encoder estimation and ADXL acceleration estimation.

위치 추정결과를 보여준다. (b)는 두 추정치의 차이를 보여준다. (b)에 나타난 차이는 APCROMB가 주기적인 움직임에 반복할 때 계속적으로 증가한다. 그림 10 (b)에서 보여진 두 추정치의 오차의 크기와 방향은 실험이 진행되는 동안 시각적으로 실측된 미끄러짐 현상과 일치한다. 이와 같은 실제 동적 거동상의 문제점을 제거하기 위한 제어기의 개발은 추후 연구과제로 남아 있다.

5. 결론

본 논문에서는 APCROMB라 불리는 자석식 자동 파이프 절단 로봇의 위치 제어를 연구하였다. APCROMB의 위치에 따른 중력 영향의 변화에 의하여 발생하는 APCROMB의 구동력 변화는 반복적인 각변위 오차를 유발하며, 본 논문에서는 이를 제거하기 위하여 다중속도 반복 학습 제어기(MRLC)를 기존의 PD 피드백 제어기와 함께 사용하였다. 일반적인 PD 제어기와 MRLC 그리고 엔코더를 이용한 각변위 추정을 사용한 새로운 제어법은 APCROMB를 이용하여 실험적으로 수행되었으며, 실험결과는 새로운 제어법의 효율성을 입증하였다. 또한, 가속계를 이용하여 추정된 APCROMB의 각변위 거동은 엔코더가 관측하지 못하는 drift 현상을 잘 나타내었으며, 이러한 결과는 육안관측 결과와도 잘 부합되었다.

1. S. J. Na. "Automation of welding process for steel water pipes", *J. of Korean Welding Society*, 1991, vol. 9, pp.1-9.
2. S. Y. Chang and S. J. Lee, "Robot application in gas pipe cutting", *J. of Korean Welding Society*, 1996, vol. 14, pp.7-14.
3. M.-C. Lee and S.-G. Lee, "Realization of nonlinear driving controller for magnetic-type automatic pipe-cutting machine against varying gravity", *Proc. of Int. Conf. on Contrl, Auto, and Sys*, 2001, Seoul, Korea, vol. 1, pp. 221-225.
4. S. Arimoto, "Mathematical theory of learning with applications to robot control," K.S. Narendra, Ed., *Adaptive and Learning Systems*, Plenum Press, New York, pp.379-388.
5. K. L. Moore, *Iterative Learning Control for Deterministic Systems*, London, Springer-Verlag, 1993.
6. N. Sadegh, "Synthesis and stability analysis of repetitive controllers," *Proc of the Amer Contrl Conf*, 1991, Boston, MA, pp.2634-2639.
7. N. Sadegh, A.-P. Hu, and C. James, "Synthesis, stability analysis, and experimental implementation of a multirate repetitive learning controller," *ASME J. of Dyn, Sys, Meas, and Contrl*, 2002, vol. 124, pp.668-674.
8. S. Rhim, A.-P. Hu, N. Sadegh, and W. J. Book, "Combining a multirate repetitive learning controller with command shaping for improved flexible manipulator control," *ASME J. of Dyn Sys, Meas, and Contrl*, 2001, vol. 123, pp.385-390.