

## 자석식 자동 파이프 절단기를 위한 신뢰성 있는 제어기 개발

김국환\*, 이명철\*, 이순걸\*\*

### The Reliable Controller Design for Magnetic Auto-Pipe Cutting Machine

Kim Gook Hwan\*, Lee Myung Chul\*, Lee Soon Geul\*\*

#### ABSTRACT

Pipe-cutting machines have been used in many fields. Recently, an automatic pipe-cutting machine that uses magnet has been developed. In this paper, a magnetic-type automatic pipe-cutting machine that attaches itself and performs unmanned cutting process is proposed. It is designed that there is a room at the bottom of its body to contain a magnet. And it uses magnetic force between the magnet and the pipe surface to prevent slip and to attach the machine to the pipe against gravity. Also the magnetic force is adjustable by changing the gap between the magnet and the pipe. This machine is, however, necessary to control cutting velocity for the elevation of work efficiency and the adjustable faculties.

During pipe cutting process, the gravity acting on the pipe-cutting machine widely varies. That is, the cutting machine gets fast when moving from the top to the bottom of the pipe and slow when moving from the bottom to the top. Actually the system is kind of a non-linear system where the gravity is function of climbing angle of the cutting machine along the pipe. Especially jerking motion is critical.

Therefore, authors design the non-linear controller that estimates the current position of the machine along the pipe and compensates the effect of gravity in this paper. It receives the feed back signal from the encoder.

**Key Words :** Disturbance (외란), Nonlinear System (비선형 시스템), Parameter Estimation (매개변수추정)

#### 기호설명

$V_i(t)$  = input voltage  
 $L_a$  = armature inductance  
 $R_a$  = armature resistance  
 $K_m$  = motor constant,  
 $K_b$  = back emf constant  
 $\phi$  : motor angular velocity

#### 1. 서론

본 연구에서는 파이프절단 작업의 자동화와 무인화를 위한 자석식 자동파이프절단기(MAPCM)와 그 제어기를 개발하였다. 개발된 MAPCM은 파이프에서의 이탈과 미끄러움을 방지하기 위해 자석을 사용하는 구조로 고안되었다.

MAPCM로 파이프 절단 시 가장 유의해야 할 사항은 그 동작속도를 일정하게 유지해야 한다는 점이다. 커터가 아닌 토치를 사용하기 때문에 절단속도가 변화하면 절단부위의 녹아 내림으로 인해 절단면이 불균일해져 절단품질이 떨어진다. 따라서, 속도에 가장 큰 영향을 미치는 중력을 보

\* 경희대학교 기계공학과 대학원  
 \*\* 경희대학교 기계 산업 시스템 공학부

상하기 위해 모터와 연결된 인코더의 신호를 이용하여 절단기의 현재 각속도를 구하고, 시뮬레이션을 통해 구한 각속도와 비교를 통해 현재 등판 각도를 추정할 수 있는 제어기를 개발하였다.

## 2. 본론

### 2.1 자석식 자동 파이프 절단기의 구조

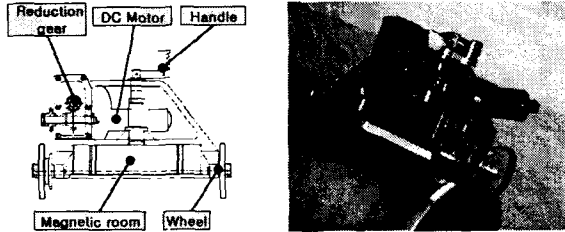


Fig. 1 (a) Diagram of pipe-cutting machine

Fig. 1 (b) Picture of pipe-cutting machine

그림 1(a)는 MAPCM의 모식도이고 (b)는 그 실물 사진이다. 하단부에는 자석이 설치될 수 있는 자석실이 있고, 핸들을 회전시켜 파이프와의 간격을 조절하여 바퀴와 파이프 사이에 충분한 부착력으로 절단기와 파이프간의 미끄러짐을 방지한다. 구동장치로 사용하는 직류모터는 웜 기어와 일체화되어 있고, 내부가 밀봉되어 있는 방수·방폭형의 구조로 되어있다.

### 2.2 시스템 모델링

터에서 발생된 토크는 감속비가  $n$ 인 감속기를 통하여 바퀴로 전달된 토크에 의해 MAPCM가 구동한다.

일반적인 모터모델은 다음과 같다.

$$V_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_b \dot{\phi} \quad (2.1)$$

모터에서 나온 회전력은 모터에 내장된 모터 기어와 절단기 내부의 웜기어 그리고 체인연결에 의해 바퀴로 전달된다. 모터에서부터 바퀴까지 총 감속비는 0.00038452이다.

동역학 모델링을 위하여 파이프상에서 주행하는 MAPCM의 free body diagram을 그림 2에 나타냈다.

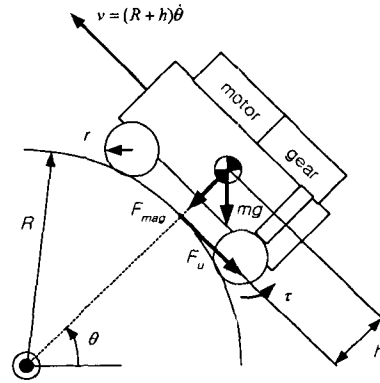


Fig. 2 Free body diagram of pipe-cutting machine

이 시스템은 마찰계수  $\mu$ 에 의해 발생하는 마찰력을 이기고 곡률반경  $R$ 인 원주상을 운동하는 물체와 같다. Tangential 방향에 대해 운동 제 2법칙을 적용하면 모델 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mu(F_{mag} + mg \sin \theta) - mg \cos \theta = m(R+h)\ddot{\theta} \quad (2.2)$$

감속기의 입력단과 출력단을 모델링 해서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$(J_m n \beta + \frac{J' \beta}{n} + \frac{rm}{n}(R+h))\ddot{\theta} + (B_m n \beta + \frac{B' \beta}{n})\dot{\theta} = T - \frac{rmg}{n} \cos \theta \quad (2.3)$$

위의 식을 등가관성모멘트  $J$ 와 등가점성마찰계수  $B$ 를 이용해 다시 간단히 하면,

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = T - T_d \quad (2.4)$$

$$J = J_m n \beta + \frac{J' \beta}{n} + \frac{rm}{n}(R+h) \quad B = B_m n \beta + \frac{B' \beta}{n}$$

$$T = K_m i_a \quad T_d = \frac{rmg}{n} \cos \theta$$

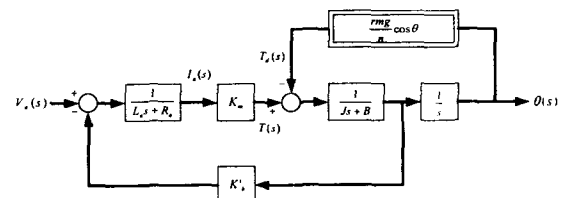


Fig. 3 Block diagram of system

시스템이 갖는 변수들과 모터의 기구부 구동 장치 모델을 그려하여 제어입력  $V_a$  에 대한 출력  $\theta(s)$ 을 블록선도로 나타내면 그림 3와 같다.

그림 4는 오픈 루프로 MAPCM 를 반경 30cm 인 파이프 상에서 1.5 회전시킨 응답과 위에서 구한 시스템 변수를 사용한 모델에 대해 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 MAPCM 의 속도는 자중에 의한 외란에 의해 sine wave 형태로 변하는 것을 알 수 있다.

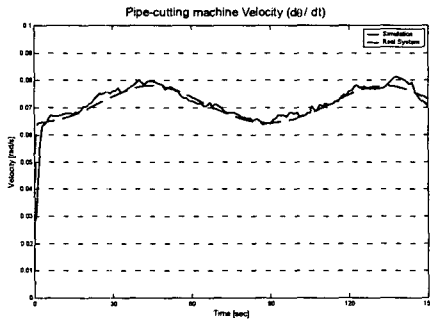


Fig. 4 comparison of simulation vs. real system

### 2.3 Controller

MAPCM 시스템은 중력, 기어 및 체인으로 인한 비선형 요소들 중에서 자중에 의한 비선형성으로 인하여 원하는 속도를 일정하게 유지하기 힘들다.

따라서 식 (2. 4)을 상태방정식으로 나타내면

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}V'_a + T'_d \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B/J & K_m/J \\ -K'_b/L_a & -R_a/L_a \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} \quad V'_a = \frac{1}{L_a}V_a \quad T'_d = -\frac{1}{J}T_d \quad K'_b = \frac{nR}{r}K_b$$

MAPCM 시스템에서 외란  $T_d$ 를 보상하는데 있어서 절단기의 등판각도를 판별하는 것이 매우 중요하다. 따라서  $\Delta t$ 에 대해

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T'_d \cdot \Delta t = \left[ \int_{t-\Delta t}^t \dot{\mathbf{x}} dt - \{\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}V'_a\} \Delta t \right] \quad (2.6)$$

위의 식을 정리하면

$$-\frac{rmg}{Jn} \cos \hat{\theta} = \frac{x_1(t) - x_1(t - \Delta t)}{\Delta t} - (a_{11}x_1 + a_{12}x_2)$$

그러므로, 현재 MAPCM 의 등판각도  $\hat{\theta}$ 을 다음과 같이 예측 할 수 있다.

$$\hat{\theta} = \cos^{-1} \left\{ \frac{x_1(t) - x_1(t - \Delta t)}{\alpha \Delta t} - \frac{(a_{11}x_1 + a_{12}x_2)}{\alpha} \right\} \quad (2.7)$$

$$\text{이때,} \quad \alpha = -\frac{rmg}{Jn}$$

Fig.5 은 추정된 등판각도와 실제 등판각도를 비교한 것이다. 초기의 0~3 초의 구간에서는 추정된 등판각도와 실제 등판각도가 차이가 나지만 나머지 구간에서는 거의 근사하게 일치함을 알 수 있다.

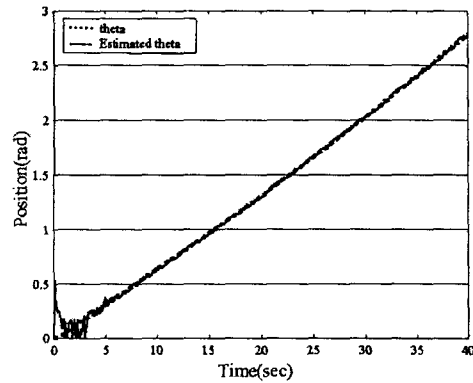


Fig. 5 Comparison of  $\theta$  vs. estimated  $\theta$

전체 시스템을 선형화 하기 위해 식 (2.5)을 상태변수로 다시 표현하면

$$\dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 - \frac{rmg}{Jn} \cos \theta \quad \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \frac{V_a}{L_a}$$

여기서 출력방정식을 두 번 미분하면 제어입력과 시스템출력에 관한 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \ddot{x}_1 = a_{11}\dot{x}_1 + a_{12}\dot{x}_2 + \frac{rmg}{Jn} \sin \theta \cdot x_1 \\ &= a^2_{11}x_1 + a_{11}a_{12}x_2 - a_{11} \frac{rmg}{Jn} \cos \theta \\ &\quad + a_{12}a_{21}x_1 + a_{12}a_{22}x_2 + a_{12} \frac{V_a}{L_a} + \frac{rmg}{Jn} \sin \theta \cdot x_1 \\ &= \frac{a_{12}}{L_a}V_a + f_1(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

