

자석식 자동 파이프 절단기의 정속제어와 MEMS 형 가속도계를 이용한 미끄럼 측정

김국환*, 이성환, 임성수, 이순걸(경희대학교 기계공학과)

Velocity Control of Magnet-Type Automatic Pipe Cutting Machine
and Measurement of Slipping Using MEMS-Type Accelerometer

G. H. Kim, S. W. Lee, S. S. Rhim, S. G. Lee (Dept of Mechanical Eng., KHU)

ABSTRACT

In this paper, a magnet-type automatic pipe cutting machine that binds itself to the surface of the pipe using magnetic force and executes unmanned cutting process is proposed. During pipe cutting process when the machine moves around the pipe laid vertical to the gravitational field, the gravity acting on the pipe cutting machine widely varies as the position of the machine varies. That is, with same driving force from the driving motor the cutting machine moves faster when it climbs down the surface of the pipe and moves slower when it climbs up to the top of the pipe. To maintain a constant velocity of the pipe cutting machine and improve the cutting quality, the authors adopted a conventional PID controller with a feedforward effort designed based on the encoder measurement of the driving motor. It is, however, impossible for the encoder at the motor to measure the absolute position and consequently the absolute velocity of the cutting machine in the case where the slip between the surface of the pipe and wheel of the cutting machine is not negligible. As an attempt to obtain a better estimation of the absolute angular position/velocity of the machine the authors propose the use of the MEMS-type accelerometer which can measure static acceleration as well as dynamic acceleration. The estimated angular velocity of the cutting machine using the MEMS-type accelerometer measurement is experimentally obtained and it indicates the significant slipping of the machine during the cutting process..

Key Words : pipe-cutting, (파이프 절단), magnetic(자석), velocity control (속도제어), velocity estimation (속도추정)

1. 서론

최근 산업현장에서 사용되고 있는 자동파이프 절단기들은 평판 위에서 움직이는 절단 작업과는 달리 절단기 자체가 파이프의 원주방향으로 움직이므로 절단기를 파이프에 고정시키기 위하여 체인이거나 레일에 의한 부착력을 갖도록 제작되었다[1,2]. 이들은 체인 등의 보조기구를 사용하기 때문에, 파이프에 탈, 부착 시 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 본 논문에서는 자석을 이용하여 부착력을 발생시키도록 제작된 자석식 자동 파이프 절단기(MAPCM: Magnet-type Automatic Pipe Cutting Machine)를 자체개발하였다.

MAPCM 은 절단기 하부에 설치된 자석을 이용하여 철계 파이프 표면에 부착되므로 기존의 보조

기구를 사용한 절단기보다 탈, 부착이 용이할 뿐만 아니라, 절단기의 크기를 소형화 할 수 있다. 파이프 절단 시 중요 고려사항인 균일한 절단면을 얻기 위해 파이프 절단기에 요구되는 중요한 기능 중 하나는 정속주행 성능이다. 그러나, 절단기는 중력방향에 수직으로 놓여있는 파이프의 원주 방향으로 주행 시, 각변위에 따라 자중이 절단기의 추진력에 미치는 영향력이 비선형적으로 변하게 된다. 이처럼 절단기의 파이프 원주상의 위치에 따른 추진력에 미치는 자중의 불균일한 영향으로 인해 절단기가 일정한 주행속도를 유지하기 어렵게 된다. 본 논문에서는 구동축에 부착된 엔코더에서 추출한 위치데이터로 feed-forward 와 PID 제어를 결합하여 자석식 자동파이프 절단기의 정속제어를 수행하였다.

한편, 알루미늄제인 절단기의 구동바퀴와 파이프면 사이의 미끄럼, 구동부의 체인 등 외란 요소들은 정속주행 성능을 저해하는 요인이며, 구동축에 부착된 엔코더 신호는 절단기가 파이프 위에서 이동할 때에 발생하는 파이프 면과의 미끄럼을 분해할 수 없으므로 이를 이용한 정밀도 높은 정속 제어는 근본적으로 불가능하다. 이러한 미끄럼 등의 비선형 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 static acceleration 을 측정할 수 있는 MEMS 형 가속도계를 이용하여, 절단기의 파이프 원주상 각변위 변화에 따라 측정되는 정가속도로부터 절단기의 절대 각변위를 계산하는 방법을 제안하였다. 이러한 방법을 통해 구동축 엔코더가 측정할 수 없었던 바퀴와 파이프 사이의 미끄럼량과 체인에 의한 비선형 요소의 값을 측정해 낼 수 있다. 이를 이용하여 본 논문에서는 MEMS 형 가속도계와 엔코더에서 얻은 각변위 측정결과를 서로 비교, 분석하여, 각변위 측정기로서의 MEMS 형 가속도계의 사용 가능성을 검증하였다.

2. 시스템 설명

2.1 자석식 자동 파이프 절단기의 구조

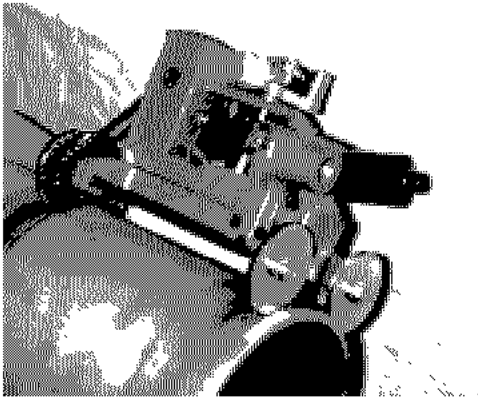


Fig.1 Picture of pipe-cutting machine

그림 1 은 MAPCM 의 실물 사진이다. 하단부에는 자석실이 있고, 핸들을 회전시켜 파이프와의 간격을 조절하여 절단기와 파이프면 사이에 충분한 부착력을 유지시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 절단기의 무게를 줄이기 위해 최대 하중 및 토크를 받는 부분은 충분한 구조적 강도를 갖도록 하여 높이 및 무게를 줄이면서 절단기의 직진성을 확보할 수 있는 최소의 높이 및 높이를 확보하였고, 상호 부품의 간섭이 없도록 설계하였다.

구동장치로 사용하는 직류모터는 웬기어와 일체화 되어 있고, 내부가 밀봉되어 있는 방수 · 방폭형 구조로 되어 있어 파이프 절단기가 주로 사용되는 산업현장의 먼지 등에 의한 모터의 마모와 고장의 원인을 방지 할 수 있도록 하였다.

2.2 시스템 모델링

모터에서 발생된 토크는 감속비가 n 인 감속기를 통하여 바퀴로 전달된 토크에 의해 MAPCM 이 구동한다.

일반적인 모터 모델은 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 모커 기어와 절단기 내부의 웬기어 그리고 체인연결에 의해 바퀴로 전달된다. 모터에서부터 바퀴까지 총 감속비는 0.0003845 이다. 동역학 모델링을 위하여 파이프 위에서 주행하는 MAPCM 의 Free Body Diagram 을 그림 2 에 나타내었다.

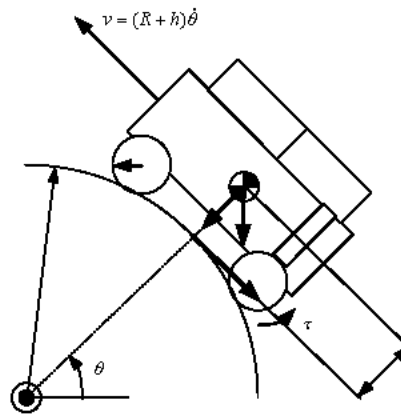


Fig.2 Free body diagram of pipe-cutting machine

이 시스템은 마찰계수 μ 에 의해 발생하는 마찰력을 이기고 곡률반경 R 인 원주상을 운동하는 물체와 같다. Tangential 방향에 대해 운동 제 2 법칙을 적용하면 MAPCM 의 모델방정식을 얻을 수 있다.

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

감속기의 입력단과 출력단을 모델링해서 다음 식을 얻을 수 있다.

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

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

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

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

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

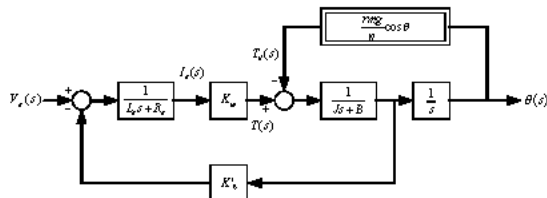


Fig. 3 Block diagram of MAPCM model

2.3 실험장치 구성

MAPCM 의 실험을 하기 위해 그림 4 와 같은 형태로 시스템을 구축하였다.

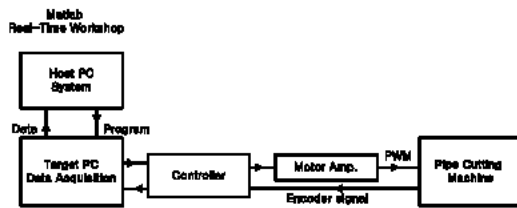


Fig. 4 Block diagram of Experimental Setup

이렇게 구현된 시스템을 통하여 직경이 17cm 인 파이프 위에서 일정한 전압하에서 회전하였을 경우, 그림 5 와 같은 양상을 나타내었다.

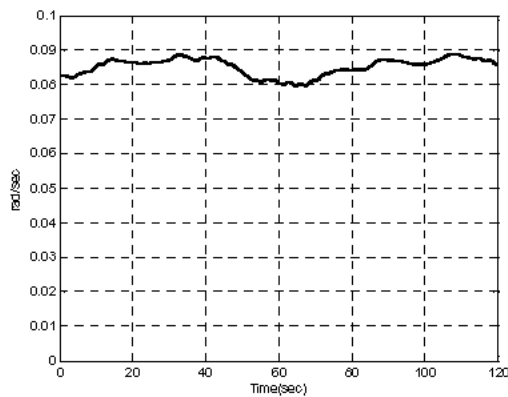


Fig. 5 Angular velocity of MAPCM without control

그림 5 에서 보는 바와 같이, MAPCM 이 파이프 위를 구동할 경우, 많은 비선형요소들을 포함하고 있음을 알 수 있다.

3. 실험결과

3.1 Feed forward 가 결합된 PID 정속 제어기

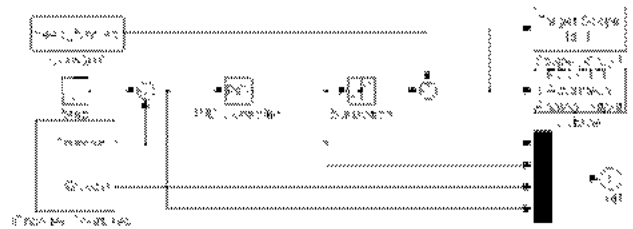


Fig. 6 Block diagram of control system

그림 7 은 정속제어를 위해 본 논문에서 구현한 PID 컨트롤러의 블록다이어그램을 나타내고 있다. 이를 통해 구해진 속도를 보면 다음과 같다.

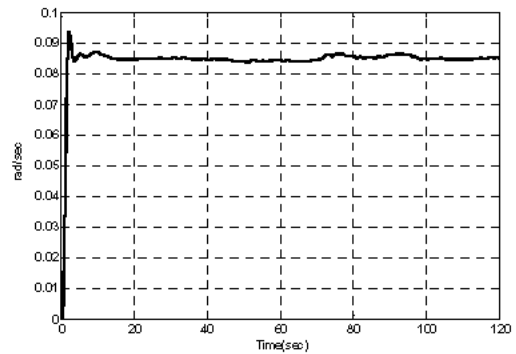


Fig. 7 Velocity control using PID & Feed forward

그림 7 과 그림 5 와 비교해 보면, 자중에 의한 속도의 변화량이 일정하게 변하였음을 알 수 있다. 이때 사용한 PID 게인 값은 정확한 모델링 값이 없기 때문에, 실험을 통하여 결정하였다. 또한, 제어 성능을 높이기 위해 feed forward 방식을 사용하여 제어루프를 구성하였다.

하지만, 미끄럼 등의 요소들로 인해 원하는 속도보다 4.31%의 오차를 갖는다. 속도가 느린 MAPCM 의 경우, 큰 오차가 아니지만 보다 정밀한 제어를 위해 본 논문에서는 MEMS 형 가속도계와 엔코더의 주행속도 데이터를 비교하였다.

3.2. 엔코더와 가속도계를 이용한 주행 속도 측정

엔코더에 의한 모터 회전수 측정으로는 미끄럼, 체인 기어 등의 절단기 내·외부의 외란 요소들을 분해할 수 없으므로 파이프 절단기의 주행속도의 정밀 제어에는 그 한계점이 있다. 따라서 이러한 외란 요소에 대한 영향이 없는 파이프 절단기의 절대 위치를 측정할 수 있는 MEMS 형 가속도계를 사용하였다. MEMS 형 가속도계는 동가속도(진동) 뿐만 아니라 정가속도(중력)를 측정할 수 있도록 제작되었다.

엔코더와 가속도계의 정확한 비교를 위하여 엔코더에 의한 제어기를 사용하지 않고 측정하여 두 데이터로부터 절단기의 속도를 비교하였다.

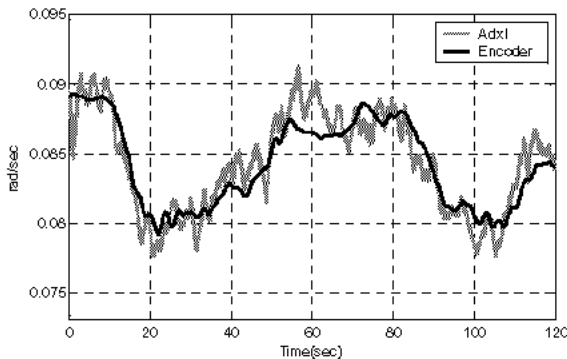


Fig. 8 comparison of velocities using encoder and accelerometer

그림 8 을 보면 MAPCM 이 중력방향으로 이동 시에 가속도계 의한 절단기의 주행 속도와 엔코더에 의한 절단기의 주행 속도 차이를 볼 수 있다. 이러한 속도차이는 엔코더가 분해할 수 없는 MAPCM 에 작용되는 외란요소를 가속도 센서를 사용하여 측정할 결과라고 볼 수 있다. 이로써 절단기의 정속 주행을 보다 정밀하게 제어 할 수 있게 된다.

4. 결론

자체 제작한 자석식 자동 파이프 절단기 (MAPCM)는, 기존의 파이프 절단기와는 달리 절단기 이외의 다른 보조기구를 사용하지 않고 자력에 의하여 부착력이 발생됨으로 절단기 발·부착시 용의성, 장비의 소형화등 장점이 있다. 그러나 파이프위를 주행하면서 절단 작업을 수행하는 다른 자동 파이프 절단기와 같이 중력장내에서 동작을 하게 됨으로, 이 때 중력의 영향으로 모터추진력에 의한 절단기의 속도가 변하게 되는데, 이를 보정하기 위하여 엔코더 신호를 입력으로 하는 Feed forward 와 PID 제어기를 사용하였다. 이 제어기를 사용하여

MAPCM 의 속도제어를 하였을 때, 원하는 속도와 비교해 볼 때, 최대 4.3 %의 오차를 나타내었다. 그런데, 만약 절단기의 바퀴와 파이프 표면에서 무시할 수 없는 크기의 미끄럼이 발생하거나 구동 체인/기어결합에 백래쉬가 존재할 경우, 엔코더에 의한 모터 회전수 측정으로는 절단기 내·외부의 외란 요소들을 분해할 수 없으므로 파이프 절단기의 정밀한 위치 및 속도제어가 어렵다. 따라서 이러한 외란 요소를 극복하기 위하여 MEMS 형 가속도계를 사용하여 절대위치 및 속도를 추정할 수 있는 가능성을 실험 하였다. MEMS 형 가속도계로 측정된 정적 가속도는 절대위치를 나타내기 때문에, 이를 이용한다면 모터 회전수를 측정하는 엔코더를 사용한 속도 제어로 극복할 수 없는 파이프 절단기의 미끄러짐 등의 영향을 고려하는 정밀한 속도제어가 가능할 것이다.

참고문헌

1. S.J.Na, "Automation of Welding Process for Steel Water Pipes" Journal of the Korean Welding Society, Vol. 9 pp 1-9, 1990.
2. S.Y. Chang and S. J Lee, "Robot Application in Gas Cutting" Journal of the Korean Welding Society, Vol. 14 pp 7-14, 1996.
3. 김국환, "자석식 파이프 절단기의 등판각 판별을 위한 실시간 비선형 에스티메이터의 설계", 경희대학교 기계공학과 석사학위논문, 2003.