

## 휠 타입 굴삭기의 무단변속시스템 적용을 위한 액시얼 사축식 피스톤 모터의 제어

이성민\*(부산대 대학원 지능기계공학과), 장성욱(부산대 정밀정형 및 금형가공연구소)  
박명관(부산대 기계공학부), 이진걸(부산대 기계공학부)

### Control of Bent Axis Inclination Piston Motor for Application Continuously Variable Transmission System

S. M. Lee(Intelligent Mech. Eng. Dept., PNU), S. O. Chang(Eng. Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, PNU), M. G. Park(Mech. Eng. Dept., PNU), J. K. Lee(Mech. Eng. Dept., PNU)

#### ABSTRACT

The traveling system of wheel type excavator, that is applied to drive method by friction of transmission, has many problems about transmission. It need to settle the problem which is occurred at wheel type excavator and to study continuously variable transmission which is used with only travel motor. This paper base on mathematical modeling for travel motor and travel motor of wheel type excavator is designed continuously variable transmission system without transmission by direct control method.

**Key Words :** Continuously variable transmission system (무단변속시스템), Wheel type excavator (휠 타입 굴삭기), Travel motor (주행모터), Proportional pressure reducing valve (비례전사 감압밸브), Direct control method(직접제어방식)

#### 1. 서론

휠 굴삭기(Wheel type excavator)는 굴삭 작업능력 뿐만 아니라, 일반 시멘트 및 주택가의 이면도로에서 별도의 보조장비 없이 이동할 수 있는 자력주행의 기능을 보유해야 한다. 현재 널리 사용되고 있는 휠 굴삭기의 주행부는 크게 트랜스미션(Transmission)과 주행모터(Travel Motor)로서 구성되어 있다. 주행모터는 메인 컨트롤 밸브(Main Control Valve)에 의해 최대, 최소의 강전각으로 전환되며, 운전자의 조작에 의한 트랜스미션의 가변으로 인하여 굴삭기의 주행 속도를 결정하게 된다. 그러나 미션의 마모, 또는 고속주행(2단) 도중에 저속주행(1단)으로의 전환시 굴삭기의 관성에 의한 충격력으로 미션의 파손등의 위험뿐만 아니라 트랜스미션에 의한 문제점이 매우 크다. 반면 트랜스미션을 제거 할 경우 기존에 사용하는 모터의 용량을 키워야 하며, 최대, 최소 강전범위가 커져야 한다. 또한 주행시의 최고속도가 트랜스미션이 있는 경우와 비교하여 분 때 2~5 km/h 정도

낮아지는 문제점을 가진다. 따라서 국내 및 일본의 경우 운전자들이 주행속도를 중요시 여기는 현상이 있으므로 트랜스미션이 없는 차량의 적용에 어려움이 야기되고 있고, 또한 시스템의 고압화에 의해 발생하는 각종 영향 등 여러 문제점을 극복하기 위한 대체 기술이 현저히 부족한 실정이다.

일반적으로 모터는 1단에서 최대 토크 모드 (Mode), 2단에서 최고속도 모드로 작동된다. 하지만 주행 거리 및 주행 환경에 따른 트랜스미션의 마모 등으로 많은 문제점을 발생시키고 있으며, 급정지시 발생하는 캐비테이션(Cavitation)으로 인한 소음 감소 또한 주요한 문제로 대두되고 있는 실정이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 트랜스미션을 제거 하고, 이에 따른 주행속도 감소 예방을 위하여 주행 모터의 입력 유량 및 압력을 직접 제어하여 주행시 발생하는 트랜스미션으로 인한 문제를 줄이고 운전자의 조작 패달의 유속에 비례하는 무단변속이 가능한 시스템을 개발함으로써 효율적인 시스템 운용과 운전조작의 편의성 및 내구성이 강한 굴삭기에 대한

개발이 점차적으로 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 트랜스미션을 제거하기 위해 사축식 모터에서 스톱퍼(Stopper)의 길이에 따른 경질각의 변화와 설정되어진 경질각에서의 최대 출력과 토크의 관계를 규명하고, 주행모터의 레귤레이터를 비례전자 감압밸브를 이용하여 제어하고 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제어 입력에 따른 모터의 유효제적의 변화와 출력속도의 조절 가능성을 검증하였다.

## 2. 주행모터의 수학적 해석

### 2.1 사축식 액시얼 피스톤 모터

휠 타입 굴삭기(Wheel type excavator)에 사용되는 주행모터(Travel motor)는 고속회전과 큰 힘을 낼수 있는 사축식 피스톤모터를 일반적으로 사용하고 있으며, 단면도 및 회로도를 Fig. 1, Fig. 2 에 나타내었다. 본 연구에서 해석하고자 하는 모델은 H사의 굴삭기중 ROBEX 1700W-3 모델의 주행모터로써 최대 용적 107 cc, 최고속도 4500 rpm가 구현가능한 사축식 액시얼 피스톤 모터이다.

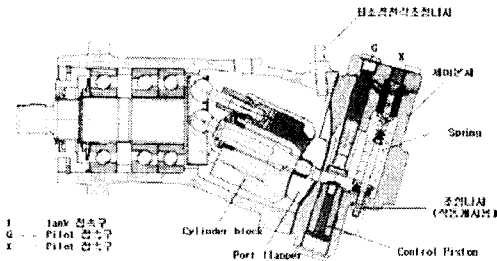


Fig. 1 Structure of bent axis inclination piston motor

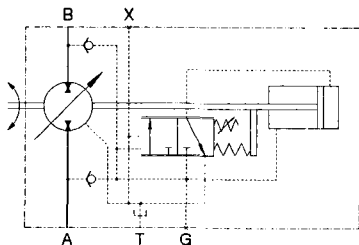


Fig. 2 Circuit of bent axis inclination piston motor

### 2.2 사축식 액시얼 피스톤 모터의 수학적 모델링

사축식 모터의 송출량은 Fig. 3 과 같이 회전속이  $\omega$  의 속도로 회전하고 실린더 블록이 회전축과 반드

는 각을  $\alpha$  최대행정을  $l_{max}$ 라 표시하고, 인질봉의 회전지름  $d$ 에서 피스톤이 상사점으로부터 움직인 거리  $l$  에 따른 회전각을  $\theta$  라고 하면

$$s = \frac{d}{2} (1 - \cos \theta) = d \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

식(1)에 의하여식(2)와 같이 나타내어 진다.

$$l = d \sin \alpha \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

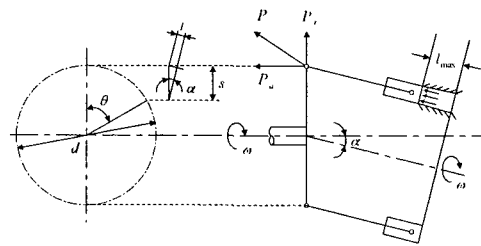


Fig. 3 Scheme of bent axis inclination piston motor

따라서 피스톤 속도  $v$  는 식(3)과 같이 표현된다.

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{dl}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{2} \omega \sin \alpha \cdot \sin \theta \quad (3)$$

피스톤의 유효단면적을  $A$ , 모터의 피스톤 수를  $z$  송출행정구간에 있는 피스톤 수를  $i$  라 하고, 송출행정 중에 있는 개개의 피스톤의 회전각을  $\theta_i$  라 할때,  $i$ 개의 각 피스톤으로부터 송출하는 순간유량의 합계  $Q_{sum}$  은 식(4)와 같이 나타낼수 있다.

$$Q_{sum} = Av = \frac{d}{2} A \omega \sin \alpha \cdot \sum_{i=1}^z \sin \theta_i \quad (4)$$

여기서,  $\theta_i = \theta_1 + (i-1)(2\pi/z)$ ,  $0 \leq \theta_1 \leq 2\pi/z$  이므로, 플린치의 수  $z$ 가 기수(odd)인 경우를 고려하면 순간유량의 합계는 식(5)과 같이 표현된다.

$$Q_{sum} = \frac{d}{2} A \omega \sin \alpha \left[ \cos \left( \theta_1 - \frac{\pi}{2z} \right) \frac{\cos \frac{\pi}{2z}}{\sin \frac{\pi}{z}} \right] \quad (5)$$

### 2.3 사축식 액시얼 피스톤 모터의 특성해설 컴퓨터 시뮬레이션

본 연구에서 사용되는 모터의 특성등을 파악하기 위해서 2.2절의 수학적 모델링을 바탕으로 하여 수치해석을 수행하였고, 모터의 제적효율이나 기계

효율을 고려하지 않은 수학적 모델을 사용하였다.

### 2.3.1. 유량과 회전수와 경진각의 관계

각각의 경진각에 대해서 회전수와 유량의 관계를 얻기 위해서 모터 표면상의 수치들을 이용하여 계산하였고, 평균 유량은 식(6)과 같이 나타내었다.

$$Q_{\text{mean}} = \frac{d}{2} \cdot A \cdot \frac{60}{2\pi} n \cdot \frac{z}{\pi} \cdot \sin \alpha \cdot \frac{1}{1000} \quad (6)$$

여기서, 경진각  $\alpha$ 를 최소경진각  $7^\circ$ 에서 최대 경진각  $25^\circ$ 까지  $1^\circ$  간격으로 변화를 하면서 rev/min의 단위를 사용하는 회전수  $n$ 과 l/min의 단위를 사용하는 유량  $Q$ 와의 관계를 수치해석하였다.

각각의 경진각에 대한 유량과 회전수, 회전수와 유량의 관계를 최대 회전수 6300 rpm과 최대 유량 380 rpm으로 부차원화하며 다음과 같다.

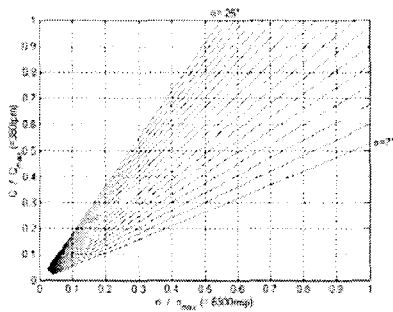


Fig. 6 The relation of inclination angle to flux

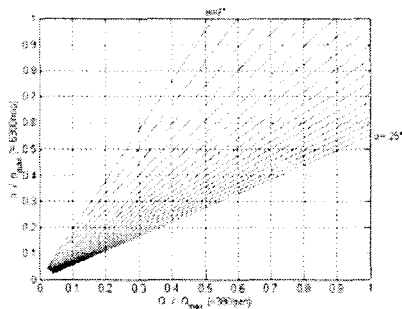


Fig. 7 The relation of inclination angle to rotation

한편, Fig. 6, Fig. 7에서의 수치해석 결과들과  $Q = V_s(\alpha) \cdot n$ 의 관계에서 용적과 경진각의 값을 Fig. 8에 나타내었다.

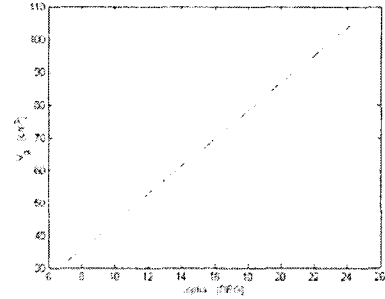


Fig. 8 The relation of inclination angle to Volumetric displacement

또한, 경진각  $\alpha$ 와 배제용적  $V_s$ 와의 관계식으로부터 유량을 고정시킨 상태에서 경진각 변화를 시키면서 회전수의 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

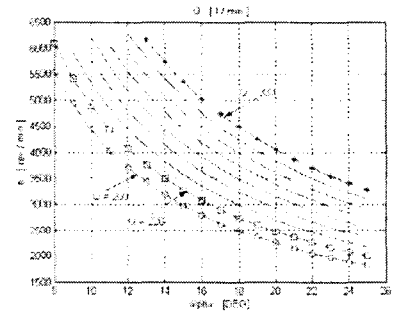


Fig. 9 The relation of inclination angle to rotation in constant flux

한편, 회전수를 고정시킨 상태에서 경진각 변화에 따른 유량의 변화를 Fig. 10에 나타내었다.

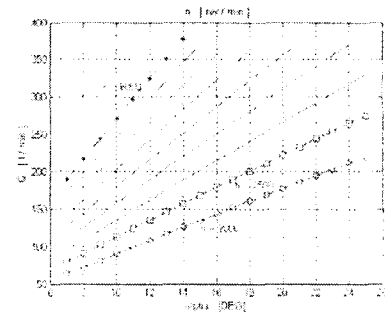


Fig. 10 The relation of inclination angle to flux in constant rotation

### 3. 주행모터의 속도제어를 위한 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 2장에서 해석된 주행모터의 수학적 모델식을 바탕으로 한 주행모터의 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였으며 그 블록선도를 Fig. 11에 나타내었다.

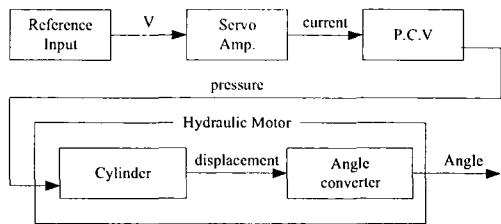


Fig. 11 Block diagram of travel motor speed control by proportional reducing valve

Fig. 11에서 나타낸 바와같이 주행모터의 경진각은 경진각을 조정하는 피스톤에 의해서 조정되고 있으며, 기존의 레귤레이터 조정방식은 최소경진각과 최대 경진각을 스톱퍼(stopper)로써 그 조정방식은 경진각을 7 에서 24 까지 다양하게 조정함으로써 모터의 회전수의 변동에 따른 굴삭기 주행속도를 자유롭게 변화시키는 것이 가능하다.

#### 3.1 비례전자 감압밸브 전용앰프의 특성

제어기로부터의 입력전압  $e$  에 대한 비례전자 감압밸브 전용앰프의 출력전류는 식(7)과 같다. 사용된 비례전자 감압밸브 전용앰프는 [URP-15W10]으로 모델링하여, 그 특성은 비례요소로서 비례 계인  $K_a=120$ 이고  $I_a=200$  mA이다.

$$I(t) = K_a e(t) + I_a \quad (7)$$

#### 3.2 비례밸브의 모델링 및 특성

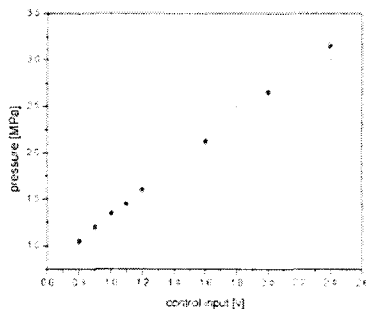


Fig. 12 Output pressure of proportional reducing valve by input voltage

본 연구에서는 실제 비례밸브에서 발생하는 시간 지연에 대한 요소만을 고려하여 시가형을 서용담 밸브를 사용했을 때의 경우를 최대한 고려하여 시뮬레이션을 행하였으며, 시정수  $T = 0.35$ 를 사용하였을 때 제어입력에 대한 비례전자감압밸브의 특성은 Fig. 12와 같다.

#### 3.3 주행모터의 모델링

주행모터는 실제 장착된 주행모터를 기준으로 하였으며, Fig. 13과 같이 경진각을 조정하는 피스톤의 변위  $x$ 의 값을 구하면 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x = 63.2 \cdot \tan \alpha \quad (8)$$

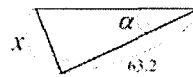


Fig. 13 Bent axis inclination piston motor (13 ton)

여기서, 피스톤의 변위  $x$ 에 따른 경진각  $\alpha$ 에 대한 값을 나타내면 Fig. 14과 같이 나타낼 수 있다.

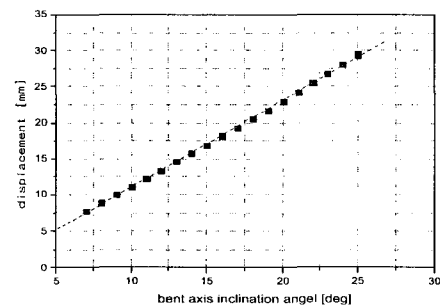


Fig. 14 Piston displacement for bent axis inclination angle

Fig. 14을 1차계로 근사하면 피스톤 변위  $x$ 와 경진각  $\alpha$ 는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{x + 0.9207}{1.20206} \quad (9)$$

주행모터의 경진 플래퍼는 스톱에 의해서 연결되어 있으며 경진스풍의 움직임은 2차계로 근사할 수 있

다. 여기서  $k$ 는 유체의 점성계수  $c$ 가 아주 작다는 가정하에서 비례전자 감압밸브의 최대출력이 가해졌을 때 최대 변위를 움직이도록 설정하였으며, 점성계수는 실험적으로 널리 사용되는 값  $c = 0.2$ 를 사용하였다. 스톨의 전량은 탄소강 45C일때의 비중치를 고려하여 직접 계산하였다.

$$k = \frac{x_{max} \cdot A}{31.5bar}$$

$$F = AP = \left(-\frac{\pi}{4} d^2\right) P_c = kx$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (10)$$

식(10)로부터 전달 함수를 구하면 식(11)과 같이 나타낼수 있다.

$$\frac{X(s)}{P(s)} = \frac{A}{ms^2 + cs + k} \quad (11)$$

여기서 A는 피스톤의 단면적을 의미한다.

### 3.4 사축식 주행모터의 경진각을 직접제어를 통한 주행속도의 제어에 대한 컴퓨터 시뮬레이션

Fig. 15에서 비례밸브를 이용하여 주행모터의 경진피스톤을 직접 제어하는 방식은 주행모터의 유효체적을 변화시킬수 있으며 그 결과 모터의 출력 속도를 제어할수 있다. 따라서 모터의 출력속도를 직접제어함으로써 사용자의 요구에 따른 굴삭기의 주행속도를 비례적으로 얻는 것을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보여주고 있다.

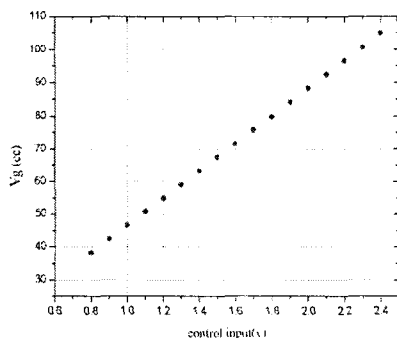


Fig. 15 Volumetric displacement by control input

## 5. 결론

본 연구에서는 휠 타입 굴삭기(Wheel type excavator)의 무단변속시스템의 적용을 위해 굴삭기의 주행모터로 적용되고 있는 사축식 액서얼 피스톤

모터의 경진각을 비례밸브를 이용하여 직접제어 하는 방식을 제시하였다. 주행모터의 경진각을 밸브를 이용해서 직접제어 하는 방식이 사후 서비스 측면이나 비용절감면에서 매우 우수하다고 할수 있다. 더 나아가 적용하는 방식에 있어서 매우 간단한 구조를 취하고 있으므로 적용성도 매우 뛰어나다고 할수 있다.

사축식 모터의 기본적인 특성에 대한 기초 자료로는 H사에서 제공한 모터의 기본적인 사양에 대한 수치와 도면을 참고하였으며, 모터의 입 출력 유량 및 작동 압력등의 기본적인 특성을 고찰하기 위하여 모터의 수학적 모델링을 바탕으로, 밸브를 이용한 모터의 경진각 제어를 통한 모터의 유효체적의 변화가 비례적으로 나타난다. 한편, 간단한 조작으로 다양한 속도변화를 얻을수 있음을 알수 있다.

굴삭기의 주행성능은 기본적인 모터 특성에 대한 고찰이 매우 중요하며 현재까지의 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 이론적인 고찰등이 실제 시스템에 적용가능성을 제시하고 있으며, 실제적인 모터 실험 및 밸브의 제어시 발생하는 파라미터의 변동등은 실제 실험을 병행할 때 좀 더 우수한 결과가 도출되리라 사료된다. 본 연구에서 제시하는 비례밸브를 이용하여 모터의 출력을 경진각에 따라 비례적으로 제어하는 방식은 원가절감 차원에서 단계별로 제어 가능한 솔레노이드 밸브(solenoid valve)와 같은 온-오프(on-off)작동 밸브를 채용함으로써 실제적인 분배로 접근이 가능하며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검토해본 결과, 밸브 지언에 따른 모터의 출력에 대한 해석이 실제 실험과 병행하여 이루어진 경우 적용가능성의 폭은 상당히 넓어질 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 손병진, 강명순, 박영조, "유압공학", 최승당
2. N. K. Sinha and B. Kusza, "Modeling and Identification of Dynamic System", Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
3. P. P. J. van den Bosch and A. C. van der Klauw, "Modeling, Identification and Simulation of Dynamical Systems", CRS Press, 1994.
4. 이상훈, "암력제어용 DDV를 이용한 전기·유압저보 시스템의 규명 및 제어", 부산대 석사학위논문, 2001.
5. Karl Johan Astrom and Bjorn Wittenmark, "Adaptive Control", Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
6. William J. Palm III, "MATLAB 공학응용", 도서출판 아진, 1999