

# 가변 오리피스를 이용한 대용량 유압시스템의 구동제어

## A Motion control of Hydraulic System using variable orifice

정재욱, 전혁수, 배연숙(국방과학연구소)

### Abstract

Generally, The mechanical or electrical type flow control valves are used to control the motion and force of a hydraulic system. In order to do the precision and feedback motion control, the electrical type valves, such as a servo-valve and a proportional-control-valve, are more convenient than the mechanical types, such as a cam-operated-valve and etc. But the mechanical types are more cheap, simple and confident than the electric types in case of the prescribed reciprocating motion and the motion control system without feedback sensors.

In this paper, The variable orifice type mechanical valve is developed for velocity control of the massive hydraulic actuators that come and go iteratively about fixed range. It is modeled and simulated the developed system using ADAMS/Hydraulics module in order to verify the performance of it.

### 1. 서론

유압시스템은 구성이 간단하고, 액추에이터의 크기에 비해 상대적으로 큰 힘을 얻을 수 있으며 또한 제어 정밀도가 좋기 때문에 산업분야의 기계 조작 기구나 동력 전달 수단으로서 널리 사용되고 있다. 액추에이터를 사용하여 유압시스템에서 요구하는 이동속도, 구동력 및 위치를 제어하기 위해서는 액추에이터에 공급되는 압력과 유량을 조절하여야 한다. 운용자가 작업장에서 직접 액추에이터의 입력을 수동으로 조절할 수도 있지만, 운용자의 수동조작이 아닌 기계적/전기적인 방법으로 액추에이터의 입력을 조절하는 것이 좀 더 편리하고 효율적이다.

유압실린더의 속도와 위치를 제어하기 위해서는 실린더에 입력되는 유압유의 유량 및 방향을 제어해야 한다. 이를 위해서 전기적 신호에 의해 방향과 유량이 조절되는 서보밸브, 비례제어밸브 등과 같은 전기식 밸브와 캠의 프로파일에 의해 유량이 조절되는 캠 구동 밸브와 같은 기계식 밸브가 주로 사용되고 있다. 전기식 밸브는 액추에이터에 공급되는 유압유의 방향, 유량, 압력 및 위치제어가 가능하며 프로그래밍에 의한 원격제어가 가능하다. 특히 서보밸브는 매우 정밀하고 빠른 응답을 요구하는 시스템의 제어에 주로 사용되고 있다. 반면에 기계식 밸브는 전기식에 비하여 임의의 위치, 속도제어에는 부적합하지만, 일정한 속도 프로파일을 가지고 일정구간을 반복 운동하는 운동기구의 속도와 위치제어에서는 신뢰도와 가격 등의 측면에서 우수한 성능을 보인다.

본 연구에서는 일정구간을 왕복 운동하는 대용량 유압실린더의 구동속도를 제어하기 위한 기계식 가변 오리피스 유량제어밸브를 개발하였다. 개발된 기계식 가변 오리피스 유량제어밸브를 사용하여 대용량 유압시스템의 유량 제어부를 구성하였고, 유량제어밸브의 성능을 입증하기 위하여 ADAMS/Hydraulics 모듈을 사용하여 유압시스템의 전산해석을 수행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 기계식 가변 오리피스 밸브 설계

#### 2.1.1 설계요구 조건

그림 1은 본 연구에서 개발한 기계식 가변 오리피스 밸브를 사용하여 유량 제어부를 구성한 유압시스템이다. 임의의 무게를 가진 물체를 끝단에 매단 상부 구조물은 회전이 가능하도록 지지 프레임에 연결되었다. 상부 구조물의 중간지점과 지면을 유압실린더로 연결하여 실린더가 확장운동을 하면 끝단에 물체를 매단 상부 구조물은 올라가고, 실린더가 수축운동을 하면 상부 구조물이 내려가는 구조이다.

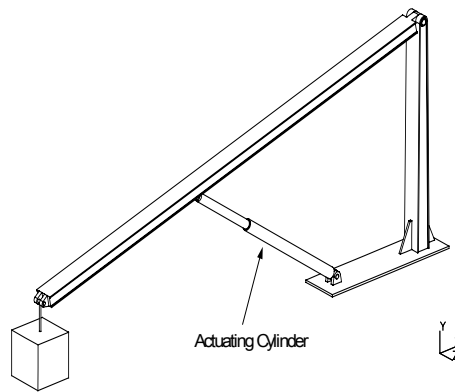


그림 1. 유압시스템 모델

상부 구조물의 올림/내림작동을 위해서 부착된 유압실린더는 단동 실린더로 동력원으로부터 기름을 공급받아 확장운동을 수행하며, 방향전환에 의한 유로변경과 구조물의 자중에 의해서 수축운동을 수행한다. 유압실린더의 작동에 의해 유압시스템은 z-축을 중심으로 회전운동이 이루어지며, 지면에 부착되는 실린더 힌지(hinge)부와 지면사이에는 회전운동에 따라 각도변화가 발생한다. 각도 변화에 따른 실린더 구동속도를 조절하기 위해서는 실린더의 공급/복귀 유량을 제어해야 한다. 이를 위해 실린더 공급/복귀라인에 회전각도에 따라 오리피스의 면적이 변화하는 가변 오리피스를 설계하여 부착하였다. 개발한 기계식 가변 오리피스 밸브의 기본설계 사양은 다음과 같다.

- 유량제어 범위 : 0 ~ 75 GPM ( at 140 Kg/cm<sup>2</sup> )
- 실린더 최대속도 및 교축시 속도 : 100mm/sec , 20mm/sec 이하 ( at 140Kg/cm<sup>2</sup> )

#### 2.1.2 오리피스 밸브 구조

그림 2는 유압실린더의 구동속도를 기계적으로 제어하기 위해서 개발한 가변형 오리피스 밸브이다. 실린더에 부착되어 있는 공급/복귀 포트와 오리피스 밸브를 커넥터로 단단히 연결하여 실린

더의 회전각도가 오리피스 밸브의 열림량을 제어할 수 있도록 설계하였다.

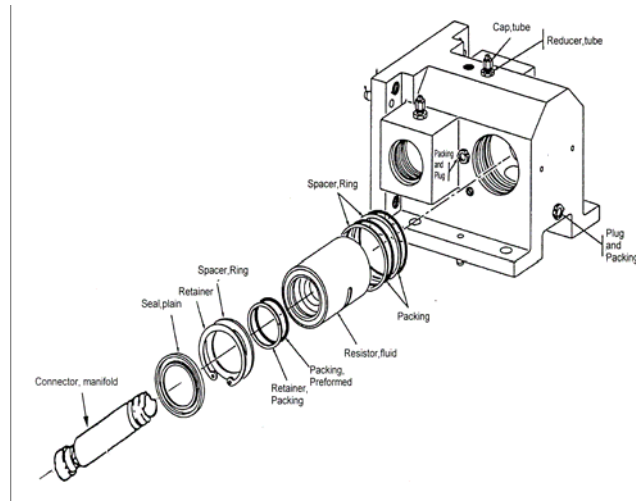


그림 2. 가변 오리피스 밸브

그림 3은 유압실린더가 확장하여 시스템 올림작동을 수행하고 수축하여 시스템 내림작동을 수행할 때, 가변 오리피스 밸브의 교축되는 과정 및 유로 형성을 보여주고 있다.

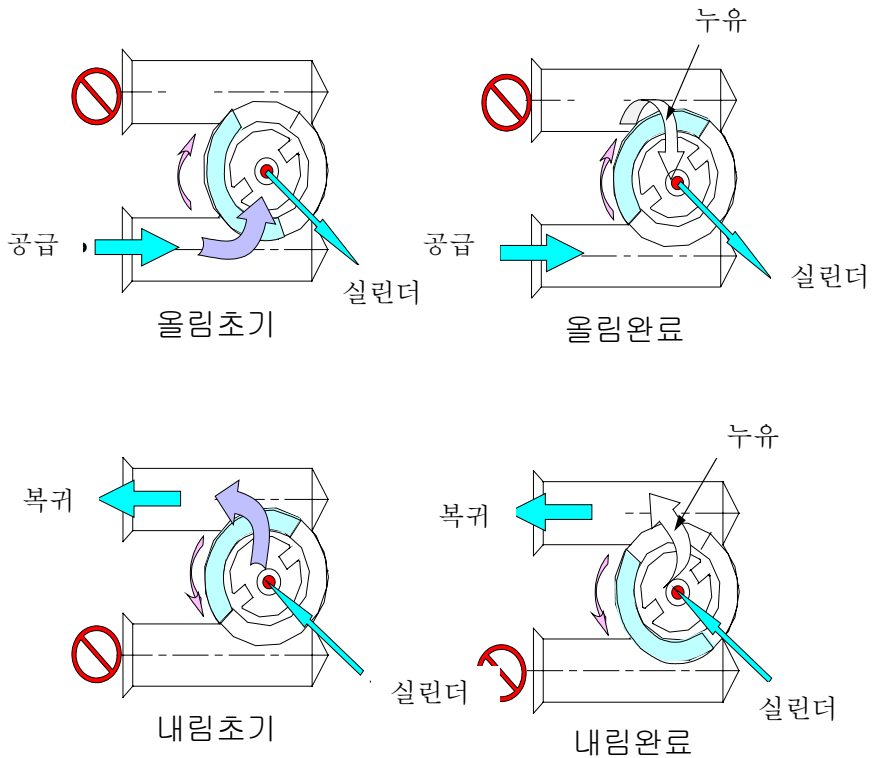


그림 3. 오리피스 밸브 작동개념도

2.2 시스템 모델링

2.2.1 기계식 가변 오리피스 밸브 모델링

오리피스를 통과하는 유량을 이론적으로 계산하기 위해서 유체가 비압축성이고 비점성이며 일차원 정상유동을 한다는 몇 가지 가정을 설정하여 유량방정식을 도출하였다.

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}} \tag{1}$$

$Q$ : 유량 ( $m^3 / sec$ )

$C_d$ : 유량 계수

$A$ : 오리피스 개구부 면적 ( $m^2$ )

$\rho$ : 유압유 밀도 ( $Kg/m^3$ )

$\Delta p$ : pressure drop across the orifice ( $N/m^2$ )

오리피스 통과유량  $Q$  를 구하기 위해서는 유량계수  $C_d$  값을 조건에 따라 정확히 선정해야 하며,  $C_d$  값은 몇 가지 오리피스 형상에 대한 실험을 통해서 알려져 있다. 그림 4는 Reynolds수에 따른 Sharp edged 오리피스의 유량계수이며, Reynolds수가 6000이상이면 대략 0.6의 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

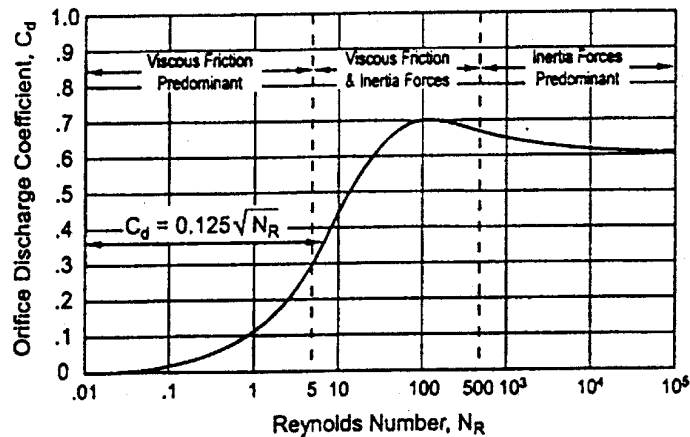


그림 4. 유량계수 versus Reynolds number

식 (1)은 점성효과를 고려하지 않았으므로 작동온도가 낮거나 오리피스를 통한 압력강하가 작은 경우와 같이 점성력(Viscous force)이 관성력(Inertia force)보다 큰 유동, 즉 Reynolds수가 작은 유동의 경우는 식 (1)을 적용할 수 없다. Reynolds수가 작은 유동에 대한 유량계수는 여러 실험결과를 분석한 결과 Reynolds수가 대략 10보다 작은 경우에 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다고 알려져 있다.

$$C_d = \delta \sqrt{N_R} \quad (2)$$

여기서  $\delta$  는 층류유동계수(Laminar flow coefficient)이며 오리피스 형상에 따라 다른 값을 가진다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하고 Reynolds 수를 수력지름(Hydraulic diameter)  $D_h$  와 점성계수  $\mu$  로 표현하면 층류에 대한 오리피스 방정식은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{2\delta^2 D_h A}{\mu} \Delta P \quad (3)$$

ADAMS/Hydraulics에서는 유량계수  $C_d$  에  $N$  (Number of identical orifices in row)과  $K$  (Entrance/exit loss coefficient)의 효과를 포함시켰으며, 부함수(Subroutine)인 ORIFIC 를 사용하여 오리피스에 대한 유량 모델을 정의하였다.

$$C_{deq} = \frac{C_d}{\sqrt{N + KC_d^2}} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{AB} = ORIFIC(R, C_{deq}, Re_{tr}, A_{max}, P_A, P_B, 0)$$

$$Q_{A_{STP}} = \frac{-\dot{m}_{AB}}{\rho_{fluid_{STP}}}, \quad Q_{B_{STP}} = \frac{\dot{m}_{AB}}{\rho_{fluid_{STP}}}$$

### 2.2.2 ADAMS 해석 모델

유압시스템과 기계시스템의 복합적 시스템을 해석하기 위해서 기존에는 유압시스템 전용해석 프로그램인 AMESim과 ADAMS를 동시에 작동시켜 AMESim에서 계산된 유압실린더의 구동힘을 ADAMS에서 받아 시스템 거동을 수행하도록 두 개의 프로그램을 인터페이스를 해주어야 했다. 그러나 ADAMS/Hydraulics 모듈은 유압회로를 구성하기 위해서 필요한 펌프, 액추에이터, 밸브, 유압탱크와 같은 주요 부품들의 모델을 가지고 있기 때문에 두 개의 프로그램을 인터페이스 해야하

는 기존의 번거로운 작업을 줄일 수 있다.

오리피스(Orifice)의 면적변화에 따른 유압실린더의 공급유량의 변화가 구동속도에 미치는 영향과 시스템의 전체적 거동에 미치는 영향을 예측하기 위한 전산해석을 수행하기 위해서 ADAMS/Hydraulics 모듈을 사용하여 유압시스템의 유압회로를 구성하였다.

그림 5는 유압시스템의 ADAMS 해석 모델 구성을 위한 주요 마커(marker) 설정위치를 나타내고 있다. 유압실린더의 최소작동거리와 최대작동거리는 Cylinder\_marker\_i와 Cylinder\_marker\_j를 사용하여 설정하였다. 구조물의 회전각도에 의한 오리피스 면적변화를 함수로 표현하기 위해서 지면에 Angle\_marker\_i와 상부 구조물의 끝단에 Angle\_marker\_j를 부착하였다. 두 마커사이의 초기 각도는 0도이다.

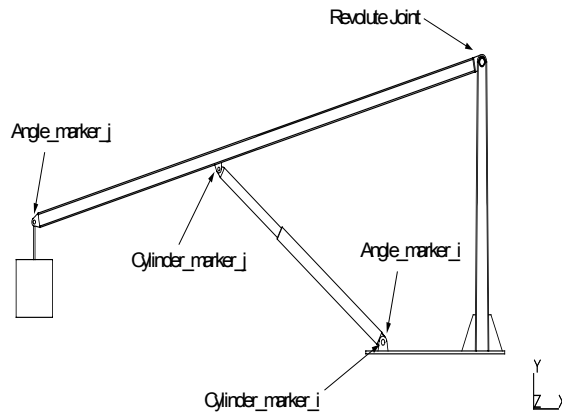


그림 5. marker의 위치

그림 6은 ADAMS/Hydraulics 모듈을 사용하여 구성한 유압시스템의 회로도이다. 유압펌프는 압력소스(Pressure source)를 사용하여 일정한 압력이 시스템에 공급되도록 하였고, 유압탱크는 가압형이 아니기 때문에 내부 압력이 대기압과 같도록 설정하였다.

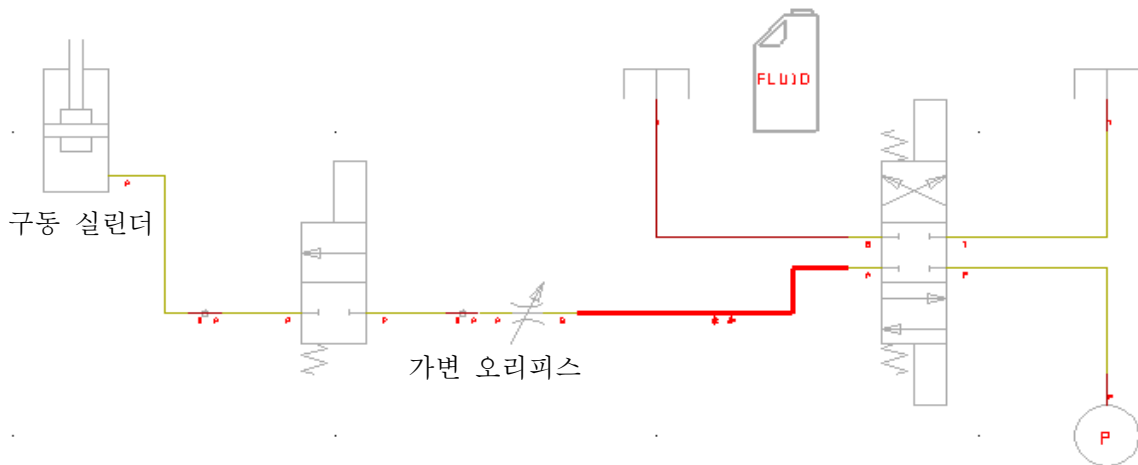


그림 6. ADAMS 전산해석 모델

### 2.3 결과 및 분석

그림 7은 시스템의 회전각도에 따른 유압실린더의 공급/복귀유량을 오리피스 출구에서 측정된 값이다. 그림 8은 시스템의 구동장치인 유압실린더가 확장/수축운동을 하여 시스템이 회전 운동한 각도를 보여주고 있다. 시스템 회전각도는 Angle\_mareker\_i와 Angle\_marker\_j사이의 변위를 측정된 값이다. 그림 9는 회전각도에 따라 유압실린더가 시스템에 가해준 힘의 크기를 보여주고 있다. 그림 10은 오리피스 면적변화에 따른 실린더의 구동속도 변화를 보여주고 있다.

해석결과 개발된 오리피스는 최대 72GPM의 유량을 흘려보낼 수 있으며, 구동속도는 최대 99mm/sec, 교축시 속도 15.3mm/sec로 기본설계 사양을 모두 충족시키고 있음을 알 수 있었다.

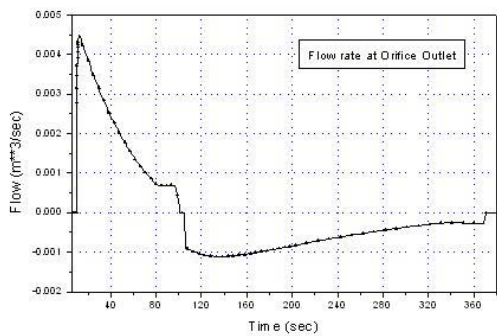


그림 7. 유량변화

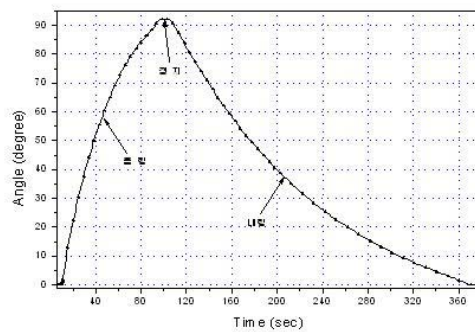


그림 8. 각도변화

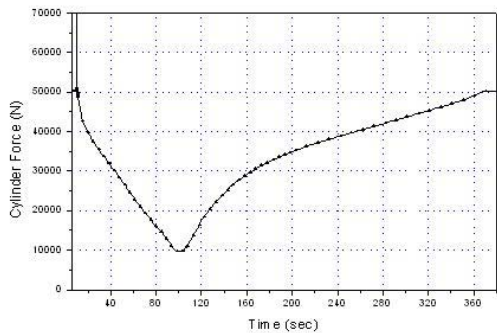


그림 9. 실린더 발생 힘

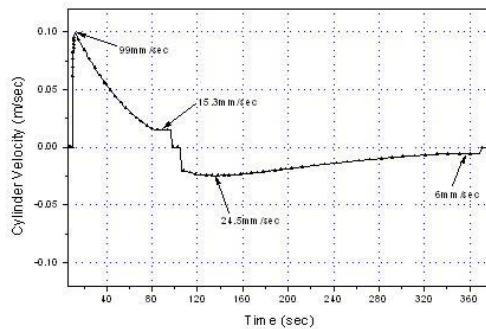


그림 10. 실린더 구동속도

### 3. 결론

ADAMS/Hydraulics를 이용하여 유압시스템과 기계시스템이 복합적으로 구성된 시스템의 해석을 쉽게 수행할 수 있었다. 전산해석 결과, 개발한 기계식 가변 오리피스 유량제어밸브는 일정 속도 프로파일을 가지고 일정구간을 왕복 운동하는 시스템에 적용 가능한 것을 알 수 있었다.

#### 4. 참고문헌

[1] Mechanical Dynamics Inc. Using ADAMS/Hydraulic Manual

[2] Mechanical Dynamics Inc. ADAMS/Hydraulics Component Reference Guide

[3] Herbert E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", 1967 by John Wiley & Sons, Inc.

[4] E.C.Fitch, I.T.Hong, "Hydraulic Component Design and Selection"