

## 시뮬레이션을 기초로한 누기보상 공압제어밸브시스템의 Design Approach 에 관한 연구

김태형\*(창원대 대학원 기계설계공학과), 정원지(창원대 기계설계공학과),  
최은재(창원대 대학원 기계설계공학과),

### A Study on the Simulation-based Design Approach for Pneumatic Control System with Anti-leakage

T. H. Kim\*(Mecha. Eng. Dept. Changwon National Univ.), W. J. Chung(Changwon National Univ.)  
E. J. Choi(Mecha. Eng. Dept. Changwon National Univ.)

#### ABSTRACT

In this paper, a new control valve which can sense air-leakage pneumatically and compensate pressure drop for an air-hoist system was proposed. A new control valve called "Pneumatic Control Valve (PCV)" functions as a control valve to compensate pressure in the case of air-leakage, by using the pure pneumatic control of pilot pressure. Based on the simulation of the proposed PCV, the experimental system was fabricated so as to illustrate the efficient performance of the proposed PCV with anti-leakage. Such good performances of PCV in the air-hoist system are shown by the simulation. In addition, the simulation-based design approach presented in this paper can be applied to any hydraulic or pneumatic-hydraulic system.

**Key Words** : Simulation-based Design (시뮬레이션-기초 디자인), Anti-leakage (누기보상), Pneumatic Control Valve (공압제어밸브, 이하 PCV)

#### 1. 서론

압축공기는 광업, 건설, 제조분야에서 많이 사용되어져 왔다. 특히 에어호이스트는 무거운 하중을 들어올릴 수 있도록 압축공기의 에너지를 기계적인 에너지로 변환시킨다. 일반적으로 압축공기는 저압도, 고압축성, 낮은 응답의 특성을 가지고 있다.<sup>1)</sup> 특히 압축공기는 동적특성에서 매우 비선형적인 결과를 가지므로 이런 종류의 장치나 기기에서 제작 및 분석이 매우 까다롭다. 현재 널리 사용되고 있는 에어호이스트 시스템의 가장 큰 문제점은 하중의 변화에 따른 비선형적인 누기를 적절히 보완할 수 있는 기능이 없다는 것이다. 즉, 누기를 공압적으로 감지하고 에어호이스트 시스템에서 요구되어지는 압력보상이 이루어져야함을 의미한다.<sup>2)3)</sup>

본 논문은 누기보상을 가진 공압 제어밸브를 개발하기 위해 시뮬레이션을 기초로한 접근방법을 제

시하고 있다. 먼저 시스템화된 누기보상체계를 집약하여 하나의 제어밸브로 설계하기 위해 단순화된 모델링이 필요하다. 이 모델링의 기초적인 해석을 바탕으로 "AMESim" <sup>4)</sup> 을 통해 공압제어밸브(PCV)의 특성들을 파악하였다.

PCV의 역할과 의미는 단순히 누기감지와 보상에만 있지 않고 임의의 무게에 따른 핸들링력 감소와 빠른 응답성을 보유하는데 있다.

#### 2. PCV의 고안

일반적으로 실제 공압에 사용되는 5 포트(port) 2 포지션(position) 파일럿 작동형 밸브의 구조는 Fig. 1과 같다. PCV는 이를 바탕으로 구체적인 설계를 위해 사용하지 않는 포트(Port)는 차단한 밸브로 변환하여 등가 시켜보면 Fig. 2와 같은 밸브로 표현할

수 있다. 여기서  $K_a$  와  $K_b$  는 밸브를 개폐하는 내부 마찰력으로 정의된다.

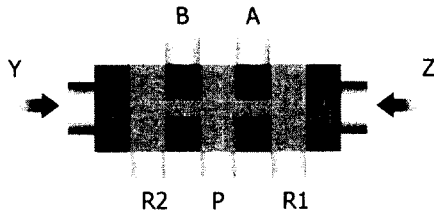


Fig. 1 5 Port 2 Position Pilot Operated Valve

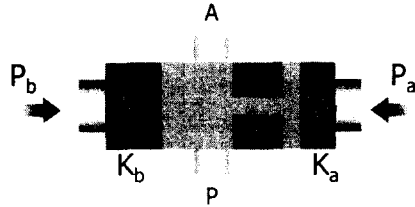


Fig. 2 2 Port 2 Position Pilot Operated Valve

Fig. 2 와 같은 2 포트 2 포지션 형태의 밸브는 정상시 상태가 결정되어야 한다. 일반적으로 정상시 닫힘 형태(Normally Close Type, N.C 형)와 정상시 열림 상태(Normally Open Type, N.O 형)로 구분된다. 보상회로에서 필요한 형태는 정상시에 닫혀 있다가 누기가 감지되면 보상을 해주는 구조가 되어야 하므로 N.C 형이 적합하다. 보상 회로의 초기 상태를 고려하여  $P_a$  와  $P_b$  의 관계가 동일한 값을 가지는 경우로 보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

N.C 형 밸브가 닫혀있는 초기상태의  $K_a$  와  $K_b$  의 관계는 식 (1)과 같이 되어야 한다. 누기가 발생할 경우  $P_b$  는 작아지며 식 (2)를 만족하면 PCV 는 열리게 된다. 압력을 보상받으므로  $P_b$  는 커지며 식 (3)을 만족하면 PCV 는 닫히게 된다. 만일 식 (4)와 같은 조건일 경우는 밸브의 개폐 상태를 그대로 유지한다.

$$P_a = P_b = P_{max}, K_b \geq K_a \quad (1)$$

$$P_b + K_b < P_a + K_a \quad (2)$$

$$P_b + K_b > P_a + K_a \quad (3)$$

$$P_b + K_b = P_a + K_a \quad (4)$$

만약  $K_a$  와  $K_b$  로 표현한 마찰력을 스프링과 같은 재질로 가정하여 보면 식 (1)을 만족하기 위해  $K_b$  는  $K_a$  보다 커야 한다. 밸브가 열리게 된 경우

의 상태는 Fig. 3 으로, 밸브가 닫히게 된 경우의 상태는 Fig. 4 로 나타낼 수 있다.

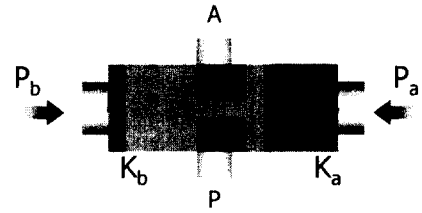


Fig. 3 2 Port 2 Position Pilot Operated Valve at Open State

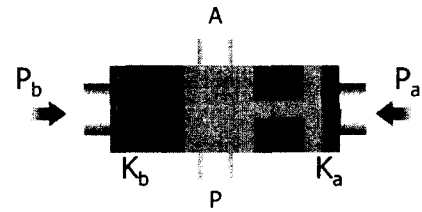


Fig. 4 2 Port 2 Position Pilot Operated Valve at Close State

밸브가 열리는 조건은  $K_a$  는 유효하지 않기 때문에 마찰력을 무시하면 식 (5)와 같다.

$$P_b + K_b < P_a \quad (5)$$

밸브가 닫히는 조건은  $K_b$  는 유효하지 않기 때문에 마찰력을 무시하면 식 (6)과 같다. PCV 에서  $P_a$  는  $P_{max}$  로 설정되고  $P_{max}$  와  $P_{min}$  사이에서 압력을 보상받게 되는  $P_b$  는  $P_a$  와 같아지게 되므로  $K_a$  는 식 (7)과 같다.

$$P_b > P_a + K_a \quad (6)$$

$$K_a < 0 \quad (7)$$

물리적으로 볼 때  $K_a$  는 음의 값을 가질 수 없기 때문에 무시하여야 한다. 그리고  $K_a$  를 무시하더라도  $P_b$  가  $P_a$  보다 큰 값을 가지기 때문에  $P_b$  가  $P_{max}$  를 초과하는 현상이 나타난다. 즉, 누기에 대한 압력만을 보상하는 것이 아니라 실제로는 하중을 상승시키는 문제점이 발생하게 된다. 따라서 Fig. 4 의 2/2 파일럿 밸브는 Fig. 5 와 같이 수정이 필요하게 된다.  $P_a$  와  $P_b$  가 극히 작은 압력으로  $P_{max}$  보다 낮다고 가정을 하면 식 (1)은 식(8)으로 표현된다. 여기서  $K_b$  는 밸브를 개폐하는 내부 마

찰력으로 PCV 설계시 무시할 수 없는 값이다.

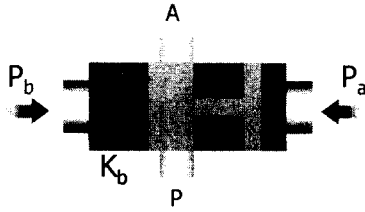


Fig. 5 2 Port 2 Position Spring Offset Pilot Operated Valve at Close State

$$P_a = P_b < P_{max}, \text{ at } K_b > 0 \quad (8)$$

따라서 밸브가 열리게 되는 조건은 식 (9)로, 밸브가 닫히게 되는 조건은 식 (10)으로 표현된다.

$$P_b + K_b < P_a, \text{ at } P_a < P_{max} \quad (9)$$

$$P_b > P_a, \text{ at } P_b < P_{max} \quad (10)$$

### 3. PCV의 모델링 및 시뮬레이션

PCV의 모델링과 분석은 France Imagine 사의 유공압 powerful software tool 인 AMESim을 사용하고 그 결과는 Fig. 6 과 같다. 밸브 드레인과 중립상태를 고려하여 3/3 밸브로 모델링하였다. 각각의 구성요소의 특성은 압력, 면적, 체적, 스프링상수, 누수량, 배관계 손실, 질량, 마찰계수 등으로 설정되어 있고 사용하지 않는 특성은 무시되어 있다. 기본적으로 사용되는 공압을 7bar로 설정하고 앞서 언급한  $P_a$ ,  $P_b$ 의 파일렛압은 솔레노이드밸브처럼 신호로 처리되어 있다. Fig. 6에서 완전히 작동된 솔레노이드 신호를 ㉑는 1, ㉒는 -1로 설정하였다. 즉, PCV에서 누기를 감지하고 보상하는 상태를 신호로 구현한 것이다. 수행시간은 5초, 밸브 개폐시간(on-off time)은 1초이다.

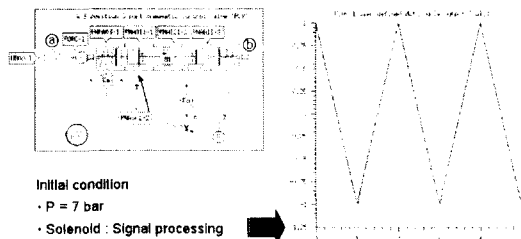


Fig. 6 Modeling of PCV

모델링된 PCV를 통해 시뮬레이션한 결과를 간략히 기술하면 다음과 같다. Fig. 7의 1번 그래프는 PNA011-2의 2번 유량포트에서 형성된 mass flow를 나타낸 것으로 밸브의 개폐신호(on-off signal)에 따라 mass flow가 발산하다가 3.8초 이후부터 일정함을 볼 수 있다. 이것은 일정한 유량과 압력으로 밸브가 제어됨을 나타낸다. 즉, 정해진  $K_b$  값에 의해 실린더쪽의 A 라인으로 일정하게 압력을 보상하고 있다는 것을 나타낸다. 2번 그래프는 PNA011-1의 2번 유량포트에서 형성된 mass flow를 나타낸 것이다. 분석은 1번 그래프와 동일하고 압력공급에 대응하는 압력드레인을 보여주고 있다.

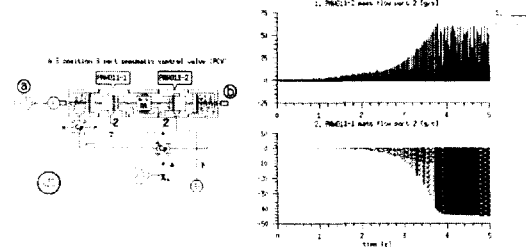


Fig. 7 Simulation of valve mass flow

Fig. 8은 드레인 포트인 PNAS01-2의 압력 상태와 스톱에 해당하는 PNAI21-1의 변위 및 가속도를 나타낸 그래프이다. 1번 그래프에서 드레인압은 대기압력을 그대로 반영하고 있다. 2번과 3번 그래프에서는 스톱의 변위와 가속도 역시 불안정하게 발산함을 볼 수 있다. 그러나 일정시간 이후 점차로 안정되어 일정한 변위에서 정밀한 위치제어가 이루어짐을 볼 수 있다.

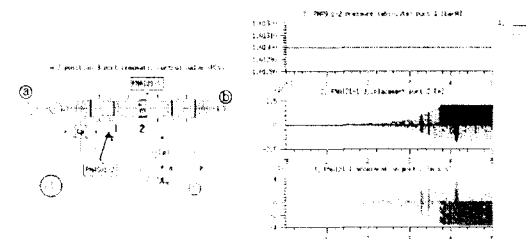


Fig. 8 Simulation of spool-parameter

### 4. 분석

시뮬레이션 결과를 분석하고 정리해보면 다음과 같은 경향과 몇가지 수학적 조건을 기술할 수 있다. Fig. 9에서 보면 누기보상으로 인해 압력분포가 일정하게 증감되고 최초의 압력만이 최대값을

가진다. 즉, 이후의 압력은  $P_b''$ 과  $P_b'$ 사이를 오가며 하중물의 위치를 유지한다. 마지막으로  $K_b$ 의 범위는 3번의 조건에 의해 이루어지므로 임의의 설정에 따라 압력변위의 폭  $L$ 은 달라진다. 이것은 수치적인 값뿐만 아니라 다른 의미도 내포하고 있다.  $K_b$  값이 작아질수록 밸브의 개폐시간은 짧아지고 반복횟수도 증가한다. 반면 응답성이 빨라지고 압력변위가 감소한다.

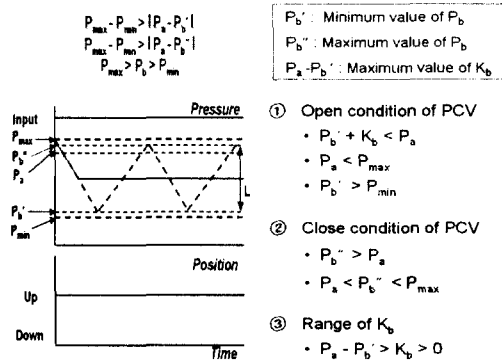


Fig. 9 Analysis of simulation

#### 4. 결론

본 연구는 시뮬레이션을 통한 모델링과 분석으로 누기를 보상할 수 있는 새로운 밸브의 Design concept을 제시하였다. 또한 시뮬레이션을 기초로 한 개념적인 접근을 시도하고 그 가능성을 확인하는데 의의가 있으며 주요 내용을 세가지로 요약하면 다음과 같다.

- 첫째, 임의의 하중에 따른 압력의 자동감지
- 둘째, 누기발생시의 압력보상기능
- 셋째, 정밀한 위치제어의 가능성
- 넷째, 응급상황시의 안정성 보장

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술센터 및 국책사업단의 지원에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

1. J. F. Blackburn, G. Reethof and J. L. Shearer, Fluid Power Control, The M.I.T. Press, 1960.

2. Y. Youm et al, A Study on a Manipulator with Automatic Balancing, Technical Report of Research Institute of Science and Technology, 1988.  
 3. S. D. Park, "Development of Pneumatic Servo System with Proportional Plus On-Off Control for the Industrial Robots," M. S. Thesis, Pohang University of Science and Technology, 1990.  
 4. IMAGINE, AMESim 3.0, France, 1998.  
 5. "Best Pneumatic", SMC Inc., 1998