

전류-공기압 컨트롤 밸브의 응답특성에 대한 실험적 고찰

배 봉 국* · 석 창 성**
(2000년 3월 2일 접수)

An Experimental Study on the Response Characteristics of Current-Pneumatic Control Valve

Bong-Kook Bae and Chang-Sung Seok

Key Words: Current-Pneumatic Positioner(전류-공기압 포지셔너), Control Valve(컨트롤 밸브), Feedback(피드백), Nozzle(노즐), Flapper(플래퍼), Pilot Relay(파일럿 릴레이), Actuator(액추에이터)

Abstract

The positioner is an essential component of the control valve which is used to control quantity of the liquid in the pipe of chemical plants. In this paper, the experimental methodology for current pneumatic positioner was developed for the investigation of the static and dynamic characteristics of the positioner. The methodology was applied to evaluate response characteristics of two different positioners, which are current model in market and newly designed model. The experimental results of these two models were compared and analyzed.

1. 서 론

컨트롤 밸브는 배관 내에서 유량을 제어하는데 이용되는 기기로써 정유, 석유화학, 정밀화학, 파워플랜트, 제지 펄프 등 여러 산업분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 이러한 컨트롤 밸브는 아직까지 대부분 외국제품의 수입에 의존하므로 경제성과 유지 보수문제 등에서 국산화의 필요성이 점차 증가하고 있다. 이러한 밸브의 국내 개발을 위해서는 사용되고있는 기존의 제품에 대한 분석과 제작 및 평가를 통한 국내기술의 확보가 선행되

어야 한다.

본 연구에서는 이러한 기술확보의 일환으로 전류-공기압 컨트롤 밸브의 특성을 평가하는 방법을 연구하고자 한다. 또한 국내에서 개발된 제품 L과 외국에서 개발된 제품 M을 대상으로 하여 응답특성을 연구하고자 하며, 이러한 연구의 결과를 설계개선의 자료로 삼고자한다.⁽¹⁾ 컨트롤 밸브는 포지셔너, 액추에이터, 그리고 바디의 3부분으로 구성되는데, 본 연구에서는 그 중 포지셔너 부분의 작동성능 평가에 중점을 두었다.

작동성능 평가를 위한 비교실험은 정특성 실험과 동특성 실험의 두 가지로 나뉘어진다. 정특성 실험이 포지셔너가 작동을 멈추고 안정화된 후의 내부상태를 조사하는 것이라면, 동특성 실험은 포지셔너가 안정화되기까지의 작동상태를 실시간으로 조사하는 것이다.^(2,3) 정특성 실험의 경우 초기조건을 일정하게 유지하기 위해 포지셔너에서

* 성균관대학교 대학원

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : csseek@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7477 FAX : (031)290-7482

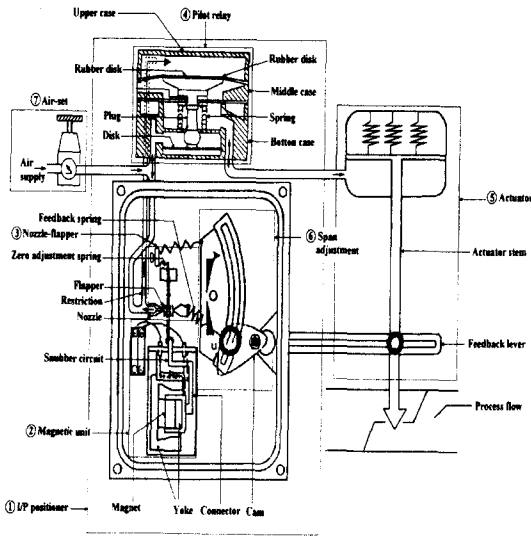


Fig. 1 Configuration of control valve

피드백 부분을 제거한 후 수행하였고, 동특성 실험의 경우 데이터를 실시간으로 받아들이기 위해 DAS(Data Acquisition System)를 이용하였다.

2. 포지셔너의 구성 및 작동

전류제어 포지셔너를 포함하여 전체 컨트롤 밸브의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 컨트롤 밸브는 전류 입력 신호를 기계적인 힘과 변위 신호로 변환시켜주는 전자석(②magnetic unit) 부분, 노즐과 플래퍼 사이의 변위 신호를 노즐 배압 신호로 바꾸어 주는 노즐-플래퍼(③nozzle-flapper) 부분, 노즐 배압 신호를 증폭시켜 주는 파일럿 릴레이(④pilot relay) 부분, 파일럿 릴레이에서 증폭된 압력 신호를 밸브의 위치 신호로 변환하는 액추에이터(⑤actuator) 부분, 그리고 밸브의 위치 신호를 피드백 시켜 노즐-플래퍼 부분에서의 변위 신호로 바꾸어 주는 스패ن 조절(⑥span adjustment) 부분, 공기를 공급하여 공압을 조절하는 공압 조절(⑦air-set) 부분 등으로 구성되어 있다.

전류제어기로부터 전자석에 4~20mA 사이의 전류가 가해지면 전류신호는 모멘트력으로 바뀌어 플래퍼에 전달된다. 이 힘에 따라 플래퍼는 노즐에 대하여 0~0.5mm의 거리를 두고 움직여 파일럿 릴레이에 걸리는 배압을 조절해 준다.

입력전류가 이전 상태보다 증가하면 플래퍼가 노즐에 접근하고 노즐의 배압이 증가하여 파일럿 릴레이에 전달된다. 파일럿 릴레이 내의 다이어프램(rubber disk)을 누르는 압력이 증가하여 다이어프램을 지지하는 스프링의 평형력보다 커지면 플러그가 밀리면서 공압 조절부와 액추에이터 사이의 유로가 개방되어 액추에이터로 공기가 유입되어 액추에이터의 압력이 증가한다. 액추에이터 내의 압력이 액추에이터 스템을 지지하는 스프링의 평형력 보다 커지면 밸브가 들어올려져서 새로운 평형상태가 되며 관내의 유로가 넓어진다.

입력전류가 이전 상태보다 감소하면 플래퍼는 노즐로부터 멀어지고 노즐 배압이 감소하여 파일럿 릴레이 내의 압력이 감소한다. 스프링력에 의해 다이어프램이 밀려나며 평형을 이룬다. 그와 함께 플러그에 닿아있던 다이어프램이 떨어지며 외부와 연결된 유로와 액추에이터의 유로가 연결된다. 연결된 유로를 통해 액추에이터의 공기가 외부로 유출되어 액추에이터 내의 압력이 작아져서 스프링력에 의해 밸브는 아래로 밀려내려가서 새로운 평형상태가 이루어지며 결과적으로 유로는 좁아진다. 최종단계에서 밸브가 움직이면 이것이 피드백되어 플래퍼에 다시 전달되어 새로운 평형상태를 이룬다. 이때 적절한 피드백을 위하여 스패 조절부를 적절히 셋팅하여야 한다.

이처럼 포지셔너가 작동하기 위해서는 입력전류로부터 플래퍼와 노즐, 파일럿 릴레이, 액추에이터 및 밸브의 작동이 원활히 이루어져야 하므로 이들 내 부분이 주요 작동 단계로써 고려되어야 할 것이다.

3. 실험장치의 구성

주요 작동 단계마다 변위 또는 압력을 측정할 수 있도록 다음과 같이 센서를 설치하여 시스템을 구성하였다. 첫 번째 단계인 노즐-플래퍼의 변위를 측정하기 위해 0.001mm의 분해능으로 최대 1mm 까지 거리측정이 가능한 비접촉식 변위 센서를 플래퍼 방향으로 노즐과 평행하게 설치하였고, 중간 단계인 파일럿 릴레이와 액추에이터의 압력을 측정하기 위해 압력 센서를 앞 쪽 끝단이 측정지점에 노출되도록 삽입하고 밀봉하여 설치하였으며, 마지막 단계인 밸브의 변위를 측정하

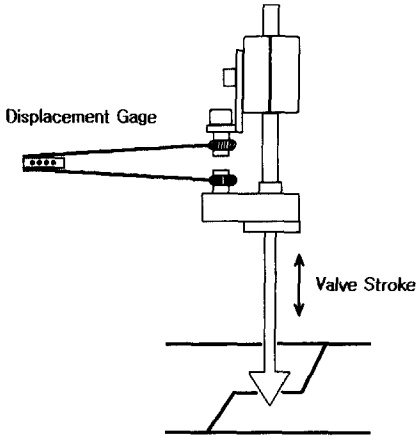


Fig. 2 Configuration of valve stroke and displacement gage

기 위하여 다이얼 게이지를 액추에이터 내의 다이어프램 상부에, 그리고 변위 게이지를 Fig. 2와 같이 지지대를 만들어 볼트의 나사산 사이에 각각 설치하였다. 설치된 센서로부터 출력되는 각 신호들은 12bit A/D 보드를 통하여 PC에 저장된다.^(4,5)

4. 정특성 평가

정특성 실험은 주어진 입력전류와 초기조건으로부터 포지셔너가 작동하여 안정화된 후의 상태를 측정함으로써 포지셔너의 내의 작동 단계들 간의 상호 작동특성을 살펴보기 위한 것이다. 초기조건은 전류제어 포지셔너에서 플래퍼가 연결되어 있는 피드백 스프링의 장력으로 주어지며, 본 실험에서는 이 초기조건을 일정하게 유지하기 위하여 피드백 과정을 제거하였다.

Fig. 3은 전류제어 포지셔너 내부의 피드백을 조절해 주는 부분으로, 피드백을 방지하기 위해 밸브 스트로크와 연결된 핀을 분리하고 플래퍼에 연결된 스프링의 장력만을 조절할 수 있게 하였다. 나사 A를 풀면 스프링의 각도를 조절할 수 있고, 나사 B를 조절하면 스프링의 장력을 변화시킬 수 있는데, 나사 A는 고정시키고 나사 B만을 조절하여 초기조건을 설정한 후 실험을 수행하였다.

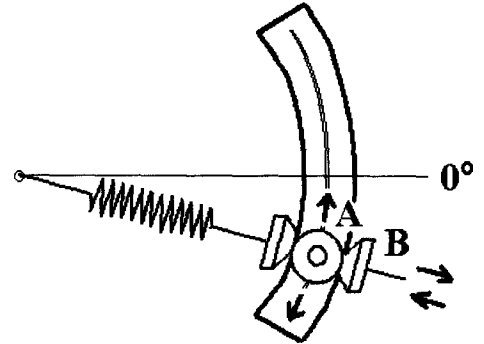


Fig. 3 Configuration of span adjustment

4.1 정특성 실험

정특성 실험에서 각 센서의 신호들은 최종 단계인 밸브 스트로크의 작동이 멈춘 후 오실로스코프를 통해 측정하였으며 밸브 스트로크의 값은 다이얼 게이지를 이용하여 측정하였다.

나사 A를 풀고 스프링의 각도를 0° 를 기준으로 하향 5° 에 고정시킨 후 B로 장력을 조절해준다. 장력은 스프링이 변화된 길이를 나사 B가 회전한 바퀴수로부터 환산하여 계산할 수 있다.

L과 M 모두 같은 스프링을 사용하지만 실험이 가능한 장력구간은 각기 다르다. L의 경우 0.586N 에서 0.969N 까지 약 0.128N 씩 증가시키며 4회의 실험을 수행하고, M의 경우 0.769N 에서 1.381N 까지 약 0.102N 씩 증가시키며 7회의 실험을 수행하였다.

4.2 결과 및 평가

두 포지셔너의 실험결과를 변수별로 하나씩 묶어 그래프로 정리하였다. 위의 그래프는 L, 아래의 그래프는 M의 결과를 나타낸다.

Fig. 4는 스프링의 초기장력이 다른 경우 입력전류에 따른 노즐과 플래퍼 사이의 거리를 나타낸 것이다. 노즐과 플래퍼 사이의 거리의 변화 폭은 서로 비슷하였지만 L이 M에 비해 노즐과 플래퍼 사이의 거리가 많이 떨어진 상태에서 작동하였는데, 이것은 M의 노즐지름이 상대적으로 크기 때문이라고 생각된다. L의 경우 장력이 달라짐에 따라 전류의 변화에 따른 노즐과 플래퍼 사이의 거리의 변화량, 즉 그래프에서 직선의 기울기가 불규칙적으로 변한데 반해 M의 경우 영

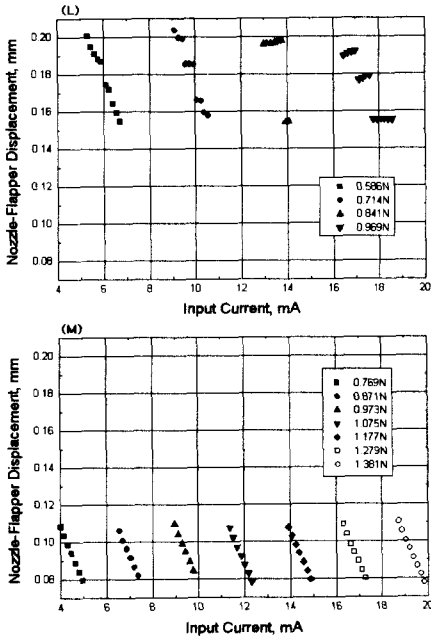


Fig. 4 Relation between input current and displacement of nozzle-flapper

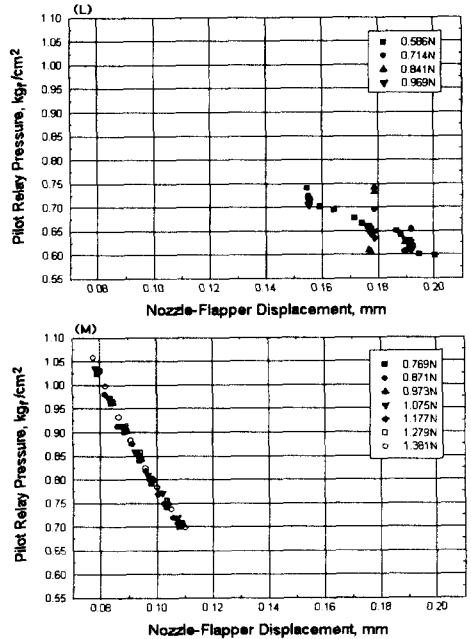


Fig. 5 Relation between displacement of nozzle-flapper and pressure of pilot relay

향을 받지 않았다. L의 경우 장력이 0.841N일때 노즐과 플래퍼 사이의 거리는 전류의 변화에도 움직이지 않았고 밸브 스트로크도 마찬가지였다. 그러다가 어느 전류값을 넘어선 순간 거리가 갑자기 좁아지면서 그때까지 움직이지 않던 밸브 스트로크가 최대로 상승하였다. 이것으로 보아 L의 경우 노즐과 플래퍼의 거리가 전류나 장력의 의해서만 결정되는 것이 아니라 다른 변수가 작용하고 있는 것으로 여겨진다. 또한 M의 경우 스프링의 초기장력이 0.769N에서 1.381N까지의 전 구간에서 전류와 변위의 관계가 선형적으로 잘 나타나 모든 구간에서 사용이 가능하나, L의 경우 스프링의 초기장력이 커지고 전류가 높아지는 경우 응답특성이 좋지 않음을 알 수 있었다. 이는 전자식 부분의 성능과 노즐 및 플래퍼의 설계 및 제작시의 오차에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 5는 노즐과 플래퍼 사이의 거리에 따른 파일럿 릴레이의 압력을 나타낸 것이다. L의 경우 초기장력이 0.841N일때를 제외하면 두 변수가 일대일로 대응한다고 볼 수 있고 대략적인 기울기 경향을 파악할 수 있다. M의 경우 L에 비해 노

즐과 플래퍼의 거리와 파일럿 릴레이의 압력이 확실히 선형적인 관계를 보인다. 기울기는 L(-3.0bar/mm)이 M(-8.3bar/mm)에 비해 낮았으며 작동하는 압력구간 역시 L(0.60bar~0.75bar)이 M(0.70bar~0.95bar)에 비해 낮고, 좁았다. 이러한 기울기 경향과 압력구간의 차이는 노즐의 지름 차이와 함께 파일럿 릴레이의 내부 공간이 M의 경우 L에 비해 상대적으로 작는데 이로 인한 영향으로 생각된다.

Fig. 6은 파일럿 릴레이의 압력에 대한 액추에이터의 압력을 나타낸 것이다. 파일럿 릴레이의 압력 변화구간은 L의 경우가 M의 경우에 비해 좁았지만 액추에이터의 압력 변화구간은 0.1bar~1.0bar로 서로 비슷하게 나타났다. 그래프 경향이 L의 경우 선형적으로 나타났으나, M의 경우 파일럿 릴레이의 전압이 0.80bar~0.85bar인 경우에는 파일럿 릴레이의 전압이 변하여도 액추에이터의 압력에는 변화가 없는 것으로 나타났다. 그러나 피드백 기능이 있으며 파일럿 릴레이의 전압이 정해지면 그에 따라 액추에이터의 전압도 정해지므로 작동에는 문제가 없을 것으로 생각된

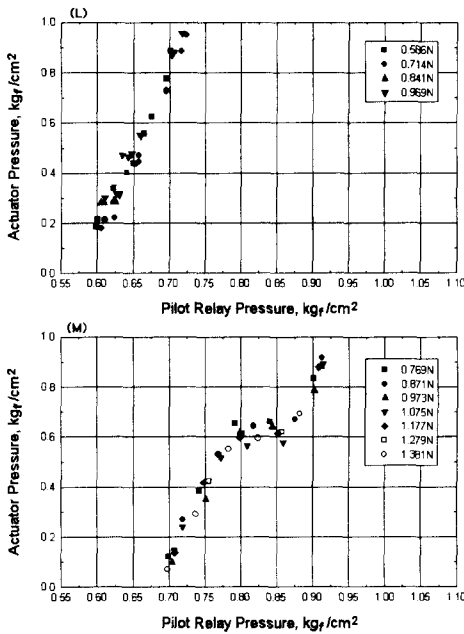


Fig. 6 Relation between pressure of pilot relay and pressure of actuator

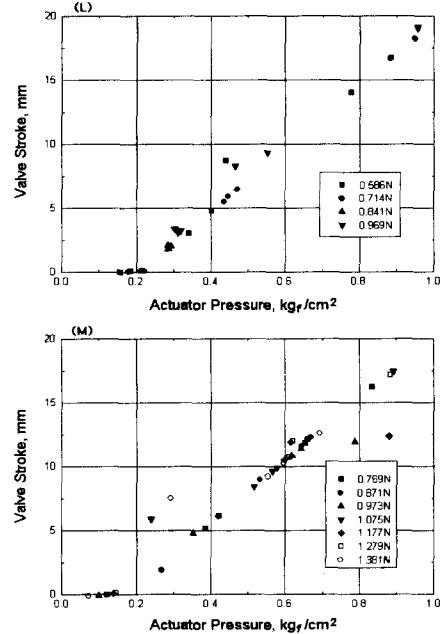


Fig. 7 Relation between pressure of actuator and valve stroke

다.

Fig. 7은 액추에이터의 압력에 대한 밸브 스트로크를 나타낸 것이다. 작동구간은 거의 일치하지만 L의 경우가 M의 경우보다 선형성이 좋으며 데이터의 분산도 적음을 볼 수 있다.

이상의 결과로부터 전자석과 노즐-플래퍼 부분의 특성은 M이 우수하며 파일럿 릴레이와 액추에이터 부분의 특성은 L이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 실제의 포시셔너는 피드백 기능을 가지고 있으며 피드백 신호에 따라 적절한 보정이 이루어지므로 두 경우 모두 사용가능하며 초기 상태가 안정적인 M의 성능이 더 우수한 것으로 생각된다.

5. 동특성 평가

동특성 실험은 피드백이 있는 상태에서 포시셔너가 안정화되기까지 시간에 따른 거동특성을 살펴보기 위한 실험이다.

5.1 동특성 실험

동특성 실험을 하기 위해서는 먼저 입력전류에 대하여 밸브 스트로크가 선형적인 관계를 가지도록 스펠 조절부를 조정하고, 변위센서와 압력센서의 초기전압, 압력센서용 전원전압 등을 측정하여 PC에 입력한다. 모든 셋팅이 완료되면 미리 설정된 전류를 입력하여 포시셔너를 작동시키고 밸브 스트로크의 움직임이 멈출 때까지의 전 과정을 실시간으로 PC로 받아들인다.

이때 입력전류는 최소 4mA, 최대 20mA로 입력범위가 정해져 있는데 전류제어기에서는 그 사이의 구간을 100, 10, 1로 나누어 각각 0.16mA, 1.6mA, 16mA의 스텝 단위로 입력전류를 변환할 수 있다. 실험은 전류제어기에서 한 번에 변환가능한 스텝 전류의 크기에 따라 16mA 변환 실험과 1.6mA 변환 실험의 두 가지로 나누어 수행하였다.

5.2 결과 및 평가

다음의 Fig. 8 ~ Fig. 11들은 변환 전류에 따라 실험결과를 정리한 것이다. 위의 그래프에는 노즐-플래퍼 간격(Flapper-Nozzle: fn)과 밸브 스트로크(valve STroke: st) 등의 변위를, 아래의 그래프

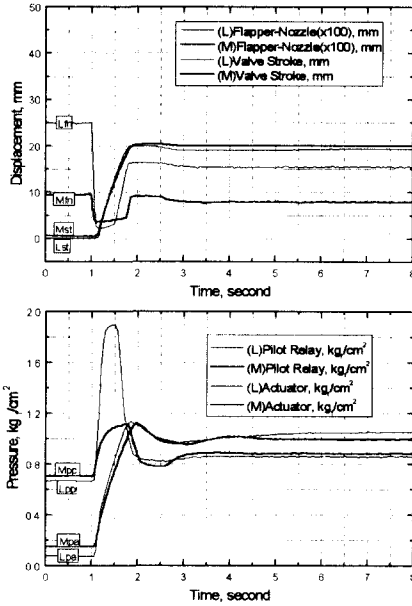


Fig. 8 Dynamic character at changing current from 4mA to 20mA

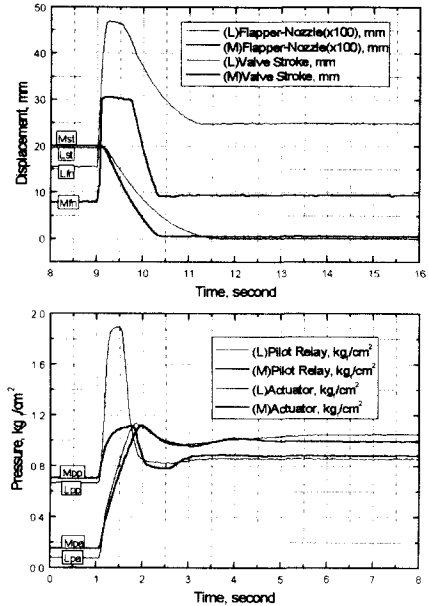


Fig. 9 Dynamic character at changing current from 20mA to 4mA

에는 파일럿 릴레이 압력(Pressure of Pilot relay: pp)과 액추에이터 압력(Pressure of Actuator: pa)을 각각 나타내었다. 비교를 위해 각 그래프마다 1초가 경과한 시점을 전류 입력 시점으로 일치시켜 L과 M을 함께 나타내었으며, 이때 L은 가는 선으로, M은 굵은 선으로 각각 표시하여 구별하였다. 또한 그래프가 의미하는 바를 알아보기 쉽도록 각 그래프마다 박스기호를 붙여두었는데, 이 기호는 제품명(L, M)과 위에서 언급한 측정변수의 약자를 합하여 나타낸 것으로써, 예를들어 Mpp는 M제품의 파일럿 릴레이의 압력을 의미한다.

Fig. 8은 4mA에서 20mA로 전류를 증가시킨 결과를 나타내며, Fig. 9는 20mA에서 4mA로 전류를 감소시킨 결과를 나타낸다. 노즐-플래퍼가 작동하기 시작한 후부터 밸브 스트로크가 작동을 멈출 때까지의 전체 작동시간은 전류가 증가·감소할 때 L의 경우 각각 0.8초, 2.5초, M의 경우 0.8초, 1.45초로, 전류가 증가하는 경우가 감소하는 경우보다 빨리 평형상태에 도달하였으며, 전류가 증

가하는 경우에는 두 제품의 작동시간이 비슷하였으나 감소하는 경우에는 M이 빨리 평형상태에 도달하였다. 또한 전류가 감소하는 경우가 상대적으로 평형에 도달하는 시간이 긴데 그 이유는 플래퍼의 작동방식에 있는 것으로 보인다. 전류가 증가하면 자력에 의하여 플래퍼가 노즐에 접근했다가 다시 밀려나는데 이때 노즐에서 분출되는 공압에 의해 빠르게 복귀하여 안정화 될 수 있다. 반대로 전류가 감소하면 플래퍼가 노즐로부터 멀어졌다가 다시 노즐 쪽으로 접근하여 안정화되는데 이때 노즐 공압에 의해 서서히 복귀하므로 상대적으로 시간이 오래 걸린 것으로 생각된다.

미소전류의 변화에 따른 동특성을 알아보기 위하여 12mA~13.6mA 구간을 선정하여 전류를 1.6mA 만큼 증가시킨 결과를 Fig. 10에, 감소시킨 결과를 Fig. 11에 각각 나타내었다. 미소전류 변화 실험에서도 동작특성은 비슷하게 나타났다.

두 제품의 작동특성을 단계별로 비교 분석해보면, 입력전류가 증가할 때 첫 번째 단계인 플

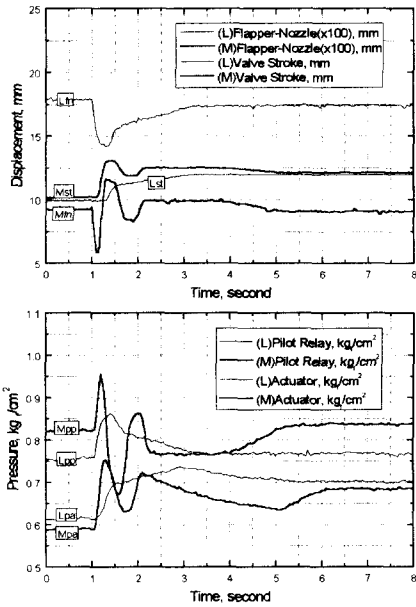


Fig. 10 Dynamic character at changing current from 12mA to 13.6mA

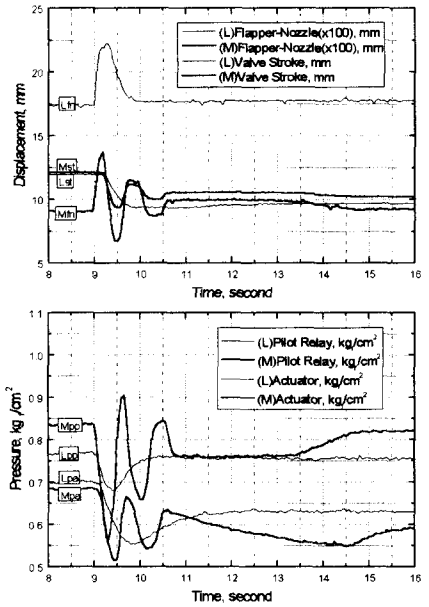


Fig. 11 Dynamic character at changing current from 13.6mA to 12mA

래퍼가 전체 작동과정 중 가장 큰 오버슈트량을 가졌고 다음 단계로 진행될수록 오버슈트량이 작아져서 마지막 단계인 밸브 스트로크에서는 오버슈트 없이 변하는 경우도 있었다.

두 제품의 전체 작동특성을 비교 분석해 보면, L은 플래퍼의 변화량이 M의 2배에서 5배 가량 컸으며 노즐과의 거리 또한 2배에서 3배의 값을 가졌다. 이에 반해 노즐의 배압변화량은 거의 동일하였으나 16mA 변환 실험에서는 L이, 1.6mA 변환 실험에서는 M이 상대적으로 크게 나타났다.

이들 Fig. 8 ~ Fig. 11에서 한 번의 오버슈트 후 서서히 변하는 양상이 대표적인 L의 플래퍼 작동특성이며 큰 진동을 보이지 않으므로 느리게 작동하였다. 이에 반해 오버슈트 후 여러번 진동하며 서서히 감소하는 양상이 대표적인 M의 플래퍼 작동특성이며, 여러번의 오버슈트로 인해 빠르고 절도있게 반응하였다. 따라서 M의 민감도가 L 보다 우수한 것으로 나타났으며, 이는 정특성 시험결과와도 일치하는 것이다. 즉, Fig. 4와 Fig. 5에서 보인바와 같이 M이 L에 비하여 응답 특성이 우수한 것으로 나타났으며 이러한 원인

의하여 M의 동특성이 우수하게 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 M에 비해서 L의 오버슈트량이 크게 나타났으며, M의 경우 전류의 변화에도 평형상태에 도달한 후의 플래퍼의 위치는 거의 동일하였으나 L의 경우에는 그 위치가 크게 차이를 알 수 있다. 이는 피드백에 의한 스프링 장력의 변화와 관계가 있으며 이 장력이 적절히 조절될 때 민감도가 우수해짐을 알 수 있다. 또한 이러한 플래퍼 작동경향 차이의 다른 원인으로서는 정특성 시험결과에서 살펴본 바와 같이 M의 경우 L보다 노즐의 지름이 크고 이로인해 플래퍼-노즐의 간격과 작동범위가 작으므로 노즐로부터의 공압에 더욱 민감하게 반응하기 때문이라고 생각된다.

정특성 시험결과에서는 L의 경우 그 특성이 양호하지 못한 경우도 있었으나 피드백 기능이 추가된 후의 동특성 평가의 결과는 그 차이가 크지 않았다. 이는 변화된 동작이 피드백에 의하여 수정되었기 때문이라고 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서는 컨트롤 밸브의 응답특성을 조사하기 위하여 포지셔너의 주요 작동단계에 센서를 설치하여 입력신호에 따른 출력신호 특성을 분석하였다. 두 개의 제품을 시험대상으로 하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초기장력에 따른 각 포지셔너의 정적특성을 조사한 결과 전자석의 성능과 노즐의 설계 및 가공정도, 노즐 플래퍼의 작동특성, 파일럿 릴레이의 작동특성이 포지셔너의 성능에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(2) 입력전류에 따른 노즐 플래퍼의 작동특성과 파일럿 릴레이의 압력변화 특성은 전류-공기압 컨트롤 밸브의 민감도에 직접적인 영향을 미침을 알 수 있었다.

(3) 파일럿 릴레이와 액추에이터의 정적특성이 좋지 않은 경우에도 실제의 경우에는 피드백 신호에 따라 재조정되므로 성능에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 성균관대학교의 1999년도 63학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- (1) LG 하니웰(주), 1995, "보일러 프로세스용 컨트롤 밸브에 관한 중간 보고서," 통상산업부, pp. 13~139.
- (2) 김종원, 1996, "공압 밸브 위치제어용 포지셔너 개발 사례," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 85~99.
- (3) Shunmugham R. Pandian, Yasuhiro Hayakawa, Yoshinori Kanazawa, Yoshiyuki Kamoyama, Sadao Kawamura, 1997, "Practical Design of a Sliding Mode Controller for Pneumatic Actuators," *Transactions of the ASME*, Vol. 119, December, pp. 666~674.
- (4) 박승원 외, 1993, "인터페이스 기초," 研學社, pp. 161~203.
- (5) 전금경 역, 1993, "센서와 마이컴의 인터페이스," 세화, pp. 23~70, pp. 337~359.