

압전구동 능동형 체크밸브를 이용한 고출력 마이크로펌프

강정호[#]

A High Power Micropump Using Active Check Valves Driven by Piezoelectric Actuators

Jung-Ho Kang[#]

ABSTRACT

In this paper, a novel high power micropump using active check valves in place of conventional passive check valves employed at the inlet and outlet ports is presented. It actively controls open/close motion of check valves using piezoelectric actuator for expansion/contraction of pump chamber. A prototype micropump having an effective size of 17mm×8mm×11mm is fabricated. Frequency-dependent flow rate characteristics, bi-directional flow characteristics and load characteristics are experimentally investigated using a timing control method for valve closing motion. From the obtained experimental results, it is ascertained that optimal values of the phase shift compared to the voltage to drive pump chamber are 15° for inlet check valve and 195° for outlet. Based on the obtained results, a sheet-type active shuttle valve that has a unified valve-body for inlet and outlet check valves is proposed. A micropump with an effective size of 10mm×10mm×10mm is fabricated and the basic characteristics are experimentally investigated.

Key Words : Micropump(마이크로펌프), Fluid Power System(유체동력 시스템), Piezoelectric Actuator(압전 액추에이터), Microactuator(마이크로액추에이터), Check Valve(체크 밸브), Shuttle Valve(셔틀 밸브), Timing Control(타이밍 제어), Bi-directional Flow(양방향 유동)

1. 서 론

원자로의 냉각용 세관(narrow pipe) 및 화학 플랜트의 가스관과 같은 위험하고 협소한 장소에서 인간을 대신하여 검사, 보수 등의 작업을 수행하는 직경 10mm크기의 마이크로머신^[1~3]과 미세부품의 가공, 반송, 조립 등을 위한 각종 기기를 통합하고 집적하

여 다품종 소량생산을 수행하는 마이크로팩토리^[4~6] 등의 구현을 위해서는 고출력밀도를 가지는 유체동력의 응용^[7]이 필요하고, 시스템의 소형화, 가동효율의 향상, 보수작업의 용이함, 누설유량의 감소 등을 위해서는 이동 중인 마이크로머신에 탑재 가능하고, 마이크로팩토리 내부의 각 기기 등을 독립적으로 구동할 수 있는 소형 유체동력원으로써 직경 10mm크기의 마이크로펌프 개발이 필요하다^[8~10].

Park는 벨로우즈(bellows)와 압전소자 등으로 구성되는 펌프 구동부의 공진에 의한 배제용적의 증대를

* 교신저자 : 삼성종합기술원 나노센터
E-mail kangjhspeed@naver.com

이용하여 간단한 작동원리의 압전 마이크로펌프를 제안하여 시제품을 제작하였고, 실험적 검토를 통해서 타당성과 유효성을 실증하였다^[8]. 그러나, 마이크로머신의 작동유체로서 응용이 기대되는 균일계 ER (Electro-rheological) 유체^[9]와 같은 비교적 점도가 높은 액체의 토출 및 마이크로팩토리 내부의 각 동작 기계와 반송장치의 구동에는 보다 향상된 마이크로펌프의 고출력화가 요구되고 있다.

고출력 마이크로펌프의 구현에 있어서 체크밸브는 펌프성과 유동특성을 결정하는 핵심 부품요소의 하나이고, 펌프의 소형화 및 응답성 향상을 위하여 외팔보 형상의 금속박막이 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 수동형 체크밸브는 펌프실 내부의 용적 변화에 따른 차압을 이용하여 밸브 개/폐를 수행하므로 밸브 개도가 작아지고, 압력손실의 증대와 캐비테이션의 발생 등에 의한 펌프 출력성능의 한계가 문제로 보고되고 있다^[10].

상기 문제점의 대책으로써 압전 액추에이터에 의해 능동적으로 체크밸브의 개/폐 타이밍을 제어하는 능동형 체크밸브를 제안하여 유효사이즈 17mm×8mm×11mm의 펌프를 제작하였다. 제작된 펌프는 무부하시 토출유량 특성실험을 통하여 밸브 개/폐 타이밍 제어에 의한 유효성은 입증되었으나^[11], 양방향 유량특성과 부하압력에 대한 토출유량특성 등의 충분한 분석이 이루어지지 않아 여전히 연구과제로서 해결이 필요한 상태이며, 전술한 바와 같은 마이크로머신이나 마이크로팩토리 분야에 적용을 위해서도 상세한 해석이 필요하다. 또한, 형상기억합금 및 열공압을 이용한 능동형 체크밸브에 관해서 연구결과^[12,13,14]가 보고된 적은 있으나, 본 연구에서 목표로 하는 유체동력원으로서의 성능 (최대유량: 100mm³/s 이상, 최대압력: 0.2MPa 이상)을 만족시키기 위해서는 응답성의 개선 및 부하특성 평가 등 극복해야 될 문제가 남아 있다.

본 연구에서는, 상기 펌프의 상세한 실험적 분석을 통하여 최종 목표로 하는 직경 10mm 크기의 마이크로펌프를 구현하기 위하여 밸브 개/폐 타이밍 제어에 대한 양방향 유량특성 및 부하특성을 검토하였으며, 또한 얻어진 결과에 기초하여 흡입측 및 토출측 체크밸브의 밸브 액추에이터(가동부)를 일체화한 능동형 셔플밸브를 제안함과 동시에 소형화를 의

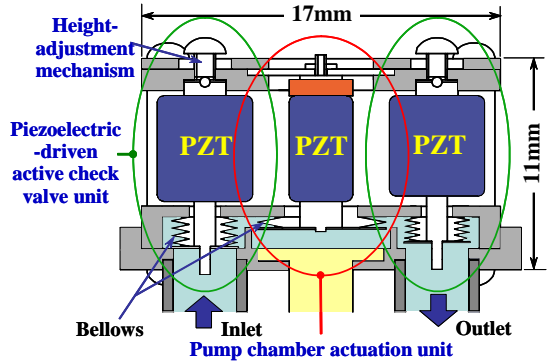


Fig. 1 Schematic of the newly devised micropump using piezoelectric-driven active check valves

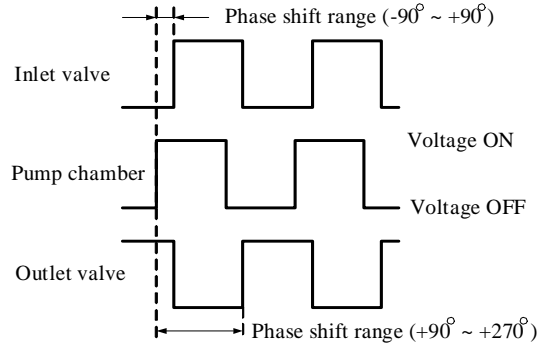


Fig. 2 Driving voltage waveforms for timing control of active check valves

도한 10mm×10mm×10mm 크기의 새로운 마이크로펌프를 설계, 제작하여 특성실험을 수행하였다.

2. 펌프 시제품의 특성실험

2.1 펌프구조 및 동작원리

제한한 능동형 체크밸브를 이용하여 제작한 공진 구동형 압전 마이크로펌프 시제품의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 공기 중에서의 공진주파수가 900Hz가 되도록 중앙부에 나타난 압전 액추에이터의 상부에는 판 스프링을, 하부에는 금속 벨로우즈를 연결하여 공진구동시킴으로써 펌프실 용적을 변화시키는 압전 액추에이터의 변위확대를 피하고 있다. 작동유

체의 주입과 더불어 커진 강성에 의하여 수 kHz의 비교적 높은 구동 주파수를 가지는 공진 구동형 압전 마이크로펌프의 응답에 추종시키기 위해서 고응답 적층형 압전 액추에이터의 출력변위를 직접 체크밸브의 개/폐에 이용하고 있으며, 펌프 구동부의 공진에 의한 펌프실의 용적변화에 대하여 흡입 및 토출측 체크밸브의 개/폐 타이밍을 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 능동적으로 제어하는 구조이다. 압전 액추에이터를 이용한 능동형 체크밸브는 밸브장착 서브플레이트에 접촉하는 원판형상의 밸브 액추에이터의 직경을 크게 함으로써 밸브 개구면적의 확대를 꾀하고 있고, 압전 액추에이터가 작동유체에 직접 접촉하는 것을 방지하기 위하여 벨로우즈를 사용하여 밀봉하고 있다. 또한 능동형 체크밸브의 상부측은 나사에 의해서 높이의 조절이 가능하도록 하였고, 압전 액추에이터가 최대변위가 되었을 때에 체크밸브가 흡입포트 혹은 토출포트를 완전히 닫을 수 있도록 설정하였다.

예비실험을 해본 결과, 원판형상의 밸브 액추에이터(두께 0.1mm)가 고주파 구동에 기인하는 것으로 보이는 변형이 있었기 때문에 두께를 0.2mm로 변경하고, 압전 액추에이터의 밀봉에 사용한 벨로우즈의 높이를 재조정하여 제작한 시제품 펌프의 유효사이즈는 17mm×8mm×11mm이다.

2.2 실험장치

밸브 개/폐 타이밍 제어에 대한 무부하시의 주파수-유량특성 및 부하특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타낸다. 시제품 펌프에 사용된 압전 액추에이터(펌프 구동부: 1개, 흡입 및 토출측 능동형 체크 밸브부: 2개)는, 독일PIEZOMECHANIK의 PSt150/2×3/5 (3mm×4.5mm×5 mm, 5.5m@150VP-P)이다. 신호발생기로부터 출력된 전압을 컴퓨터(computer)와 D플립플롭(flip-flop)소자를 이용한 위상천이용 전자회로를 통해서 일본 (株)MESTEK의 고출력증폭기(M-2643, 3채널모드시 출력 1.5A)로 150VP-P까지 증폭하여 3개의 압전 액추에이터에 각각 인가한다. 펌프실 구동용 전압파형에 대해서 흡입측 체크밸브에서는 -90에서 +90까지, 토출측 체크밸브에서는 +90에서 +270까지 독립적으로 위상을 변화시킴으로써, 능동적으로 밸브 개/폐 타이밍 제어

를 수행한다. 작동유체에는 기포를 제거한 수도수(tap water)를 사용하였다. 부하압력은 토출포트에 연결된 가변교축밸브를 조정하여 인가하고 압력계로 측정한다. 무부하시의 주파수-유량특성에 있어서는 가변 교축 밸브가 완전히 열린 상태에서 유량은 단위시간당 유출한 물의 질량을 밀도로 나누어 구하였다.

2.3 주파수-유량특성

주파수-유량특성의 실험결과를 Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 처음에는 흡입측 능동형 체크밸브의 개/폐 타이밍을 펌프실 구동의 수축/신장 타이밍에 일치시켜 실험을 하였고, 흡입측과 토출측 능동형 체크밸브에 인가하는 전압의 위상차는 180°로 고정하였다.

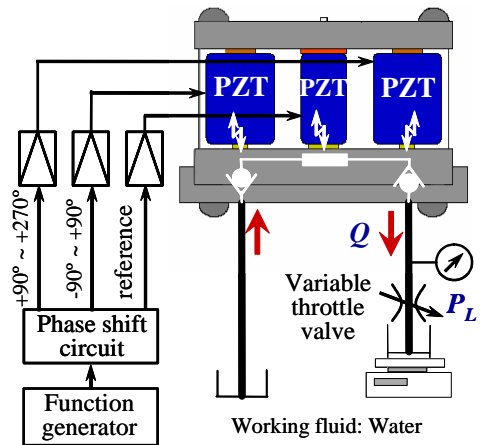


Fig. 3 Experimental apparatus

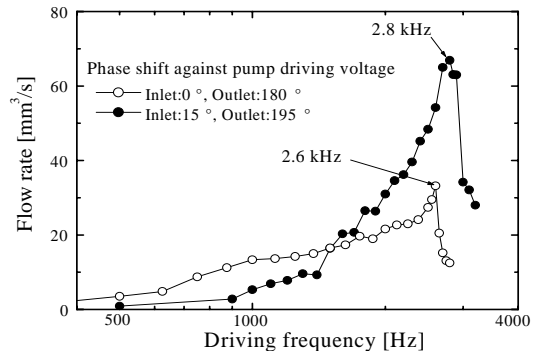


Fig. 4 Frequency characteristics of the flow rate with timing control when load pressure is zero

Fig. 4에 보여 지는 실험 결과로부터 구동 주파수 2.6kHz에서 최대유량 33mm³/s가 얻어지는 것을 알 수 있다. 이전의 결과^[11] (구동주파수 4.6kHz에서 최대유량 52mm³/s)에 비교하면 유량이 감소하는데, 이것은 펌프를 새롭게 제작할 때에 발생한 펌프 구동부의 낮은 강성이 원인이라고 생각된다. 정밀하게 조립하면 유량특성이 향상될 수 있으나, 본 연구에서의 실험 여건 상 시제품 펌프를 사용하여 이후의 실험을 수행하였다.

다음에 흡입측과 토출측의 인가전압 위상차를 180로 고정하고, 펌프실 구동 전압파형에 대하여 흡입측 능동형 체크밸브의 개/폐 타이밍을 제어하여 실험을 하였다. 그 결과 흡입측에서 15, 토출측에서 195의 위상을 지연시켰을 때에 구동주파수 2.8kHz에서 최대유량 65mm³/s가 얻어졌고, 이전의 연구결과^[11]와 비슷하게 토출유량이 현저히 증가하는 경향이 확인되었다. 이유로써는, 밸브 개/폐의 위상지연으로 펌프실 내부의 강성이 높아짐으로써 주파수 향상에 의한 유량 증가분과 유체 관성에 의한 유량 증가 등이 생각되나, 향후 펌프실 내부의 유동해석을 통하여 보다 명확히 분석할 필요가 있다.

이상의 결과에 기초하여 능동형 체크밸브를 최적으로 구동할 수 있는 위상차를 구하기 위하여 흡입측 또는 토출측 능동형 체크밸브의 위상차를 15 또는 195로 고정하여 토출측 혹은 흡입측 인가전압의 위상을 각각 변화시켜서 실험을 수행하였다. 이 두개의

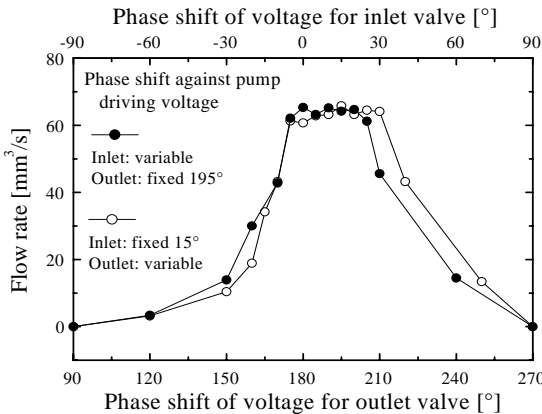


Fig. 5 Measured flow rates with timing control when load pressure is zero

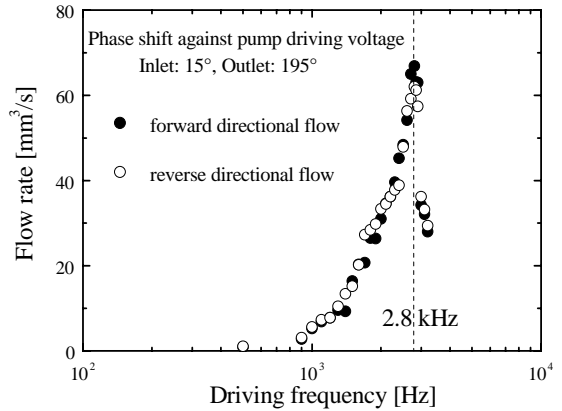


Fig. 6 Bi-directional frequency-dependent flow rate characteristics when load pressure is zero

결과를 종합하여 Fig. 5에 나타낸다. 15 또는 195의 앞뒤 10 이내의 위상변화 영역에서는 거의 동등의 유량이 얻어져, 펌프실 구동 전압파형에 대하여 흡입측 및 토출측 능동형 체크밸브의 구동에 적절한 위상 범위가 존재한다는 것을 알 수 있었다. 또한 두 개의 유량특성이 거의 비슷한 경향을 나타내고 있는 것으로 보아서 위상을 역전시킨 역방향 유동에 있어서도 그다지 큰 영향은 없을 것으로 예측된다.

2.4 양방향 유량특성

Fig. 3에 나타난 흡입측 및 토출측 능동형 체크밸브의 위상을 역전시켜 무부하시의 주파수-유량특성의 실험을 하였다. 이 실험에서의 위상차는 전절에서 최적으로 구해진 흡입측15, 토출측 195를 사용하였으며, 실험결과를 Fig. 6에 도시하였다. 또한, 비교분석을 위해서 순방향 유량특성의 실험결과도 같이 나타내고 있다. 양방향 유량특성에 있어서 최대유량이 얻어지는 구동주파수는 똑 같은 2.8kHz이고 주파수에 대한 유량특성은 거의 일치하고 있다. 이후 양방향의 부하 특성에 관한 검토도 필요하지만 이상의 결과를 종합해 보면 밸브 개/폐 타이밍 제어에 대한 능동형 체크밸브의 타당성이 확인되었다 할 수 있다.

2.5 부하특성

부하압력에 대한 토출유량 특성을 구하였다. 구동 주파수는 무부하시의 특성실험에서 최적으로 구해진 2.8kHz이다. 펌프실 구동 전압과형에 대하여 흡입측 체크밸브의 위상차를 15로 고정하고 토출측의 위상을 변화시켰을 때의 실험결과를 Fig. 7에, 토출측 체크밸브의 위상차를 195로 고정하고 흡입측의 위상을 변화시켰을 때의 실험결과를 Fig. 8에 나타낸다. 두 결과에 있어서 최대압력은 약 0.2MPa, 최대유량은 약 $65\text{mm}^3/\text{s}$ 이고 부하압력과 유량의 곱으로 구해지는 최대출력과위는 3.8mW이며 두 실험결과에 그다지 큰 차이는 보이지 않는다.

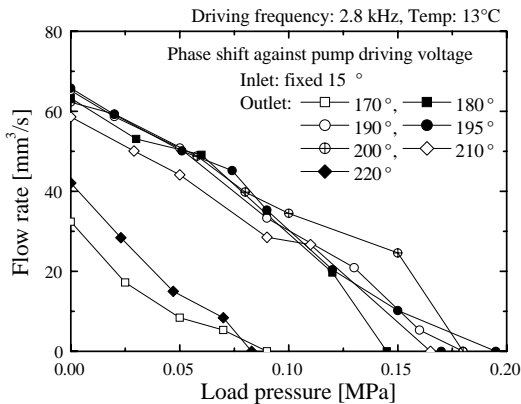


Fig. 7 Load characteristics with variable phase shift of active check valve in outlet

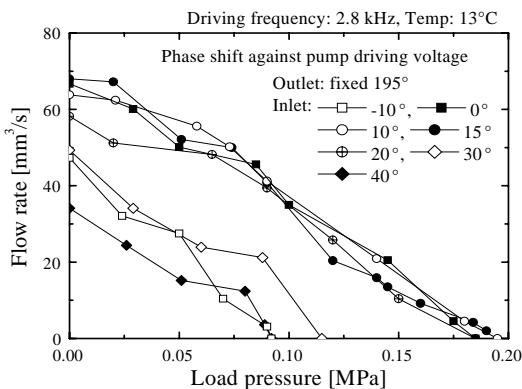


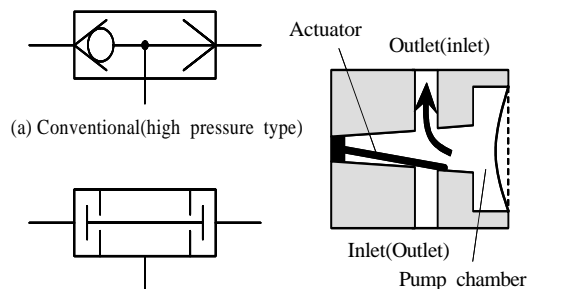
Fig. 8 Load characteristics with variable phase shift of active check valve in inlet

또한 무부하시의 유량특성의 실험결과와 유사하게 흡입측 또는 토출측 능동형 체크밸브의 위상차를 15 또는 195로 고정했을 때에 토출측에서는 195, 흡입측에서는 15의 위상을 중심으로 약 10 이내의 위상변화 영역에 있어서, 고출력이면서 동등한 부하특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 펌프실 구동 전압과형에 대하여 흡입측 및 토출측 능동형 체크밸브의 위상차를 180로 고정한다면 고출력의 펌프성능을 유지하면서 흡입측 및 토출측 능동형 체크밸브의 밸브 액추에이터를 공유하여 일체화하는 것이 가능하므로 한층 더 펌프의 소형화가 실현 가능하다고 할 수 있다.

3. 능동형 셔틀밸브를 이용한 마이크로 펌프

3.1 능동형 셔틀밸브의 제안

전술한 실험결과에 기초하여 본 연구에서는 고출력 마이크로펌프의 소형화를 목적으로 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 흡입측 및 토출측 능동형 체크밸브의 밸브 액추에이터를 일체화한 새로운 구동원리의 능동형 셔틀밸브를 제안한다. Fig. 9 (a)와 (b)에 유공압 분야에서 흔히 사용되는 셔틀밸브의 간략기호를 나타낸다. 강구(steel ball) 등을 사용하여 두개의 관로를 압력에 의해 선택해, 항상 고압측 혹은 저압측만의 관로를 접속시키는 구조이나, Fig. 9 (c)에 나타낸 바



(a) Conventional (high pressure type) (b) Conventional (low pressure type) (c) Proposed active shuttle valve
Fig. 9 Proposition of a sheet-type active shuttle valve

와 같이 제안하는 능동형 셔틀밸브는 액추에이터에 의해서 외팔보 형상의 가동부의 움직임을 펌프실 내부의 용적변화에 따라서 능동적으로 제어한다. 펌프실의 팽창과 더불어 작동유체의 흡입 시에는 토출포트를 닫음으로써 토출측 체크밸브의 역할을, 펌프실의 압축에 의한 작동유체의 토출 시에는 흡입측 체크밸브의 역할을 수행한다.

그러나, 본 연구에서는 Fig. 10에 도시한 바와 같이 수 kHz의 비교적 높은 구동주파수를 가지는 펌프실 구동부의 응답에 추종시키기 위해서 힌지에 의한 변위확대의 원리를 이용하여 고응답 적층형 압전 액추에이터의 출력변위를 증폭시킴으로써 체크밸브의 개/폐에 이용하고 있다. 구조가 간단하고 더욱이 펌프실 용적변화에 대하여 밸브 액추에이터의 동작을 역전시키는 것만으로도 역방향 유동이 가능하기 때문에 응용범위는 매우 넓다고 할 수 있다.

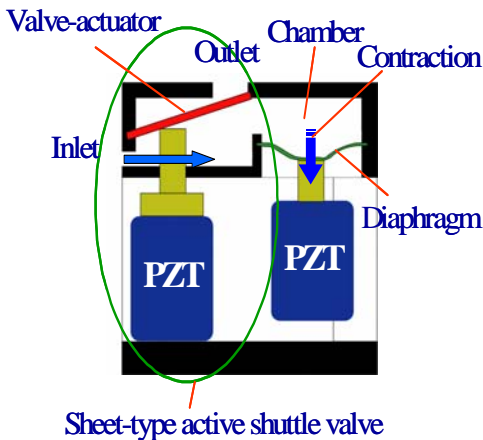


Fig. 10 Schematic of the fabricated micropump using a sheet-type active shuttle valve

3.2 마이크로펌프의 제작

제한한 능동형 셔틀밸브를 이용하여 소형화를 목적으로 새로운 마이크로펌프의 시제품을 제작하였다. 펌프의 개략도를 Fig. 10에, 사진을 Fig. 11에 나타내었다. 펌프 시제품의 유효사이즈는 10mm×10mm×10mm이다. 최대유량 400mm³/s, 공기 중 구동에 있어

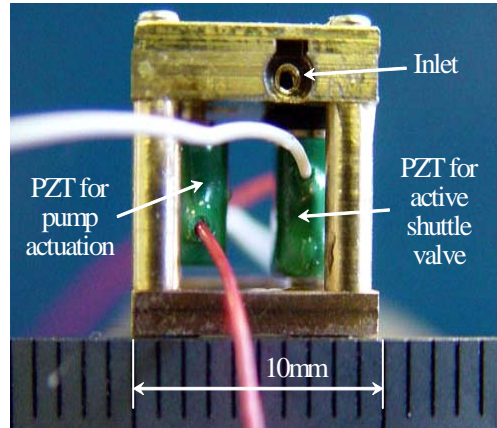


Fig. 11 Photocopy of the fabricated micropump

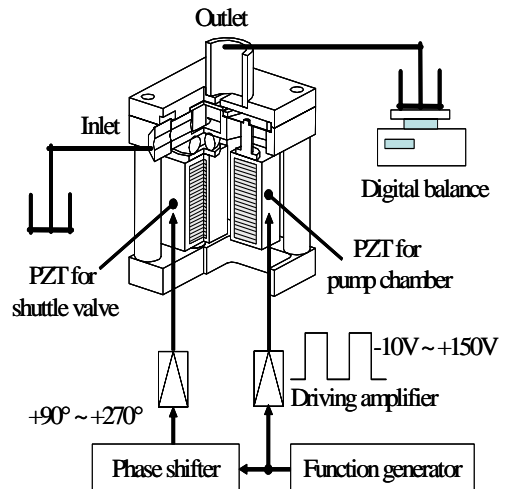


Fig. 12 Experimental apparatus for the micropump

서 펌프실 구동부의 공진 주파수 700Hz를 설계사양으로 하였다. 펌프실 및 능동형 셔틀밸브의 구동에 사용된 적층형 압전 액추에이터는 독일 PIEZOMECHANIK의 PSt150/2×3/5 (3mm×4.5mm×5mm, 5.5m@150V_{P-P})이다. 밸브 개구면적의 증대를 피하기 위해서 힌지에 의한 변위확대의 원리를 이용하여 압전 액추에이터의 변위를 능동형 셔틀밸브의 밸브 액추에이터의 자유단 변위에 있어서 9배 증폭시키는 구조이다. 펌프실의 용적변화를 일으키는 다이어램은 두께 0.03mm, 유효직경 3.8mm이며 재질은

인칭동(phosphor bronze)이다. 능동형 셔틀 밸브의 밸브 액추에이터의 재질은 스테인리스이고 폭 3.2mm, 길이 3.62mm, 두께 0.2mm이다. 간단한 계산에 의해서 구해진 밸브 액추에이터의 고유진동수는 38kHz이고 작동유체의 주입에 의해서 펌프실의 강성이 증가하여 수 kHz의 펌프 구동에 있어서도 셔틀밸브 자체의 공진은 발생하기 어렵고 펌프실의 용적변화에 고 응답으로 추종 가능하다.

3.3 실험방법

제작한 펌프의 주파수-유량특성을 파악하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 12에 나타낸다. 신호발생기로부터 출력된 구형파 전압을 일본 (주)MESTEK의 고출력증폭기(M-2643, 3채널모드시 출력 1.5A)로 증폭하여 펌프실 구동용 압전 액추에이터에 인가한다. 또한, 능동형 셔틀밸브 구동용 압전 액추에이터에는, 위상천이용 전자회로를 사용하여 펌프실 구동용 전압파형에 대해서 +90에서 +270까지 독립적으로 위상을 변화시킨 전압파형을 증폭시켜서 인가함으로써, 펌프실 구동의 수축/신장 타이밍에 따라서 능동적으로 밸브 개/폐 타이밍 제어를 수행한다. 작동유체는 기포를 제거한 수도수(tap water)를 사용하였다. 무부하시의 유량 측정에 있어서는 단위시간당 유출한 물의 질량을 밀도로 나누어 구하고 있다.

3.4 실험결과

제안한 펌프를 사용하여 무부하에 있어서 능동형 셔틀밸브의 개/폐 타이밍 제어에 의한 토출유량 특성 실험을 하였으며, 그 결과를 나타내면 Fig. 13과 같다. 펌프의 구동 주파수는 2.0kHz이다. 그림에서 180의 위상차는 펌프실의 팽창과 더불어 작동유체가 흡입될 때에 셔틀밸브가 흡입포트에서 열리기 시작하는 상태를 의미한다. 제안한 셔틀밸브의 작동에 의한 펌핑은 확인되고 있으나, 수 mm³/s의 미소유량밖에 얻어지지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 14는 압전 액추에이터의 신장에 의하여 확대된 밸브 액추에이터의 변위를 측정된 결과이다. 횡축은 압전 액추에이터에

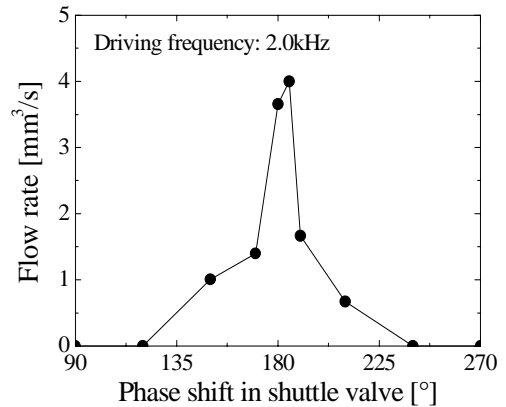


Fig. 13 Measured flow rates with timing control of the active shuttle valve

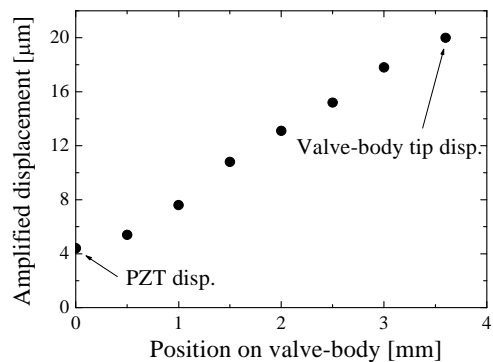


Fig. 14 Measured displacements of the valve-body

의해 지지된 힌지점부터 자유단까지의 위치를 나타낸다. 토출유량이 적게 얻어진 원인으로서는 Fig. 14에 나타낸 바와 같이 밸브 액추에이터의 변위가 설계치(40m)의 절반밖에 되지 않아 펌프실 팽창과 더불어서 토출측 밸브로부터 흡입포트로 누설이 발생했기 때문이다. 이후 밸브 액추에이터의 재설계에 의해서 누설유량을 저감한다면 펌프 출력이 한층 더 향상하리라고 기대한다.

4. 결 론

본 연구에서는 압전 액추에이터에 의해서 능동적

으로 체크밸브의 개/폐 타이밍을 제어하는 능동형 체크밸브를 이용한 공진구동형 압전 마이크로 펌프의 양방향 유량특성 및 부하특성 등의 상세한 실험적 검토를 하여, 펌프 구동부의 용적변화에 대하여 흡입 및 토출측 능동형 체크밸브에 인가하는 전압파형의 특정 위상차에 있어서 토출유량이 현저히 증가한다는 점과 고출력의 부하특성을 나타낸다는 점 등을 확인하였다. 또한 얻어진 실험결과에 기초하여 흡입측 및 토출측 능동형 체크밸브의 밸브 액추에이터를 일체화한 능동형 셔틀밸브를 제안함과 동시에 소형화를 꾀한 10mm×10mm×10mm 크기의 새로운 동작 원리의 마이크로 펌프를 설계, 제작하여 특성실험을 하였다. 비록 만족할 만한 토출성능은 얻어지지 않았지만 제안한 능동형 셔틀밸브의 동작확인을 통해서 새로운 유체기계요소들의 가능성을 제시하였다.

본 연구에서 수행한 고출력 마이크로펌프와 같은 새로운 유체기계요소는 마이크로 공작기계와 인간친화형 지능로봇 등의 분산 유체동력원으로서의 응용에 적합하다고 할 수 있다. 이러한 분야의 연구는 마이크로 액압제어 서보 시스템 또는 바이오 메카트로닉스 분야의 요소기술을 확립함과 동시에 유체제어 공학 및 로봇공학 등의 새로운 응용분야 개척에 많은 도움이 될 수 있으리라 본다.

참고문헌

1. Takeda, M., "Applications of MEMS to Industrial Inspection," Proc. MEMS2001, pp. 182-191, 2001.
2. Yoshida, K., Takahashi, K. and Yokota, S., "An In-Pipe Mobile Micromachine Using Fluid Power (A Mechanism Adaptable to Pipe Diameters)," JSME International Journal (Ser. B), Vol. 43, No. 1, pp. 29-35, 2000.
3. Yoshida, K., Park, J.-H., Shimizu, T. and Yokota, S., "A Micropump-Mounted In-Pipe Mobile Micromachine Using Homogeneous Electro-Rheological Fluid," Proc. 3rd IFToMM International Micromechanisms Symposium, pp. 2-7, 2001.
4. Gaugel, T., et al., "Building a mini-factory from a technology construction kit," Proc. 3rd International Workshop on Microfactories, pp. 5-8, 2002.
5. Gengenbach, U., et al., "A Modular and Flexible Assembly System for Micro Fluidic Analysis Systems," Proc. 3rd International Workshop on Microfactories, pp. 65-68, 2002.
6. Takahashi, S., Kitagawa, H., Makino, H. and Ogawa, H., "A Novel Liquid Handling Device for Microfactory," Proc. 3rd International Workshop on Microfactories, pp. 133-136, 2002.
7. Yoshida, K. and Yokota, S., "Study on High-Power Micro-Actuator Using Fluid Power," Proc. FLOMEKO'93, Vol. 1, pp. 122-130, 1993.
8. Park, J. H., Yokota, S. and Yoshida, K., "A Piezoelectric Micropump Using Resonance Drive with High Power Density," JSME International Journal (Ser.C), Vol. 45, No. 2, pp. 502-509, 2002.
9. Park, J. H., Yoshida, K. and Yokota, S., "Micro Fluid Control System Using Homogeneous ER Fluids (Proposition of micro ER valve and basic experiments)," Proc. IROS'99, Vol. 2, pp. 1063-1068, 1999.
10. Park, J. H., Yoshida, K. and Yokota, S., "Resonantly Driven Piezoelectric Micropump (Fabrication of a micropump having high power density)," MECHATRONICS, Vol. 9, No. 7, pp. 687-702, 1999.
11. Park, J. H., Yoshida, K., Igarashi, K., Yokota, S., Seto, T. and Takagi, K., "A Resonantly-Driven Piezoelectric Micropump Using Active-Type Check Valves," Proc. 2002 JSME Annual Meeting, pp. 253-254, 2002.
12. Sinohara, J., Suda, M., Furuta, K. and Sakuhara, T., "A High Pressure-Resistance Micropump Using

- Active and Normally-Closed Valves,” Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 2000, pp. 86-91, 2000.
13. Kohl, M., Skrobanek, K.D. and Miyazaki, S., “Development of stress-optimized shape memory microvalves,” Sensors and Actuators A, Vol. 72-3, pp. 243-250, 1999.
14. Grosjean, C., Yang, X. and Tai, Y.C., “A Practical Thermopneumatic Valve,” Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 1999, pp. 147-152, 2000.