

능동형 체크 밸브를 이용한 고출력 압전 마이크로펌프

박중호^{†*}·요시다 카즈히로^{**}·요코타 신이치^{**}·함영복^{***}·윤소남^{***}

High-output Piezoelectric Micropump Using Active Check Valves

Jung-Ho Park, Kazuhiro Yoshida, Shinichi Yokota,
Young-Bog Ham and Sonam Yun

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

Abstract

A novel piezoelectric micropump using active check valves in place of conventional passive check valves in inlet and outlet has been proposed and investigated. It actively controls open/close motion of check valves using piezoelectric actuator for expansion/contraction of pump chamber. In this paper, bi-directional flow characteristics and load characteristics are experimentally investigated using an adequate timing control for valve closing motion with a prototype micropump fabricated with the effective size of $17 \times 8 \times 11 \text{mm}^3$. From the experimental results, it is ascertained that optimal values of phase shift against voltage to drive pump chamber for realization of a miniaturized but powerful micropump, are 15° in inlet check valve and 195° in 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 the effective size of $10 \times 10 \times 10 \text{mm}^3$ is fabricated and basic characteristics are experimentally investigated.

1. 서 론

최근 원자로의 냉각용 세관(narrow pipe) 및 화학 플랜트의 가스관과 같은 위험하고 협소한 장소에서 인간을 대신하여 검사, 보수 등의 작업을 수행하는 마이크로머신(micromachine)과, 미세부품의 가공, 반송, 조립 등을 위한 기기를 통합하고 집적하여 다품종 소량생산을 수행하는 마이크로팩토리 (microfactory)의 실현을 위한 연구와 개발이 활발히 수행되어지고 있다^{(1)~(4)}.

실용적인 작업을 위해서 충분한 동력(power)을 필요로 하는 마이크로머신과 가동성(mobility) 및 유연성(flexibility)을 요구하는 마이크로팩토리의 실현을 위해서는 고출력밀도를 가지는 유체동력의 응용이 하나의 대안으로 생각되어지고 있으며⁽⁵⁾,

이와 관련된 연구의 하나로 이동중인 마이크로머신에 탑재 가능하고 마이크로팩토리 내부의 각 기기 등을 독립적으로 구동 가능한 마이크로 유체동력원이 되는 고출력밀도의 마이크로펌프 개발이 필요하다.

저자의 일부는, 벨로우즈와 압전소자 등으로 구성되는 펌프 구동부의 공진에 의한 고출력화를 위해 간단한 메카니즘의 압전 마이크로펌프를 제안하여 시제품을 제작하였고, 실험적 검토를 통해서 타당성과 유효성을 실증하였다⁽⁶⁾. 그러나 마이크로머신으로의 응용이 기대되는 균일계 ER(Electro-rheological) 유체⁽⁷⁾와 같은 비교적 점도가 높은 액체의 펌핑 및 마이크로팩토리 내부의 각 동작기계와 반송장치의 구동에는 보다 향상된 마이크로펌프로 고출력화가 요구되어진다.

한편, 제작의 용이함과 누설유량의 저감을 위해서 사용된 외팔보 형상의 수동형(passive) 체크 밸브는 고정부가 존재하기 때문에 밸브 개도가 작고, 압력손실의 증대와 캐비테이션(cavitation) 발생 등에 의한 펌프 출력성능의 한계가 문제되어지고 있다⁽⁸⁾.

^{†*} 일본 동경공업대학 정밀공학연구소
한국기계연구원(KIMM) Brain Pool 외국초빙과학자
E-mail: jhpark@pi.titech.ac.jp, jhpark@kimm.re.kr

^{**} 일본 동경공업대학 정밀공학연구소

^{***} 한국기계연구원(KIMM) 정보장비그룹

상기 문제점의 대책으로써, 압전 액추에이터에 의해 능동적으로 체크 밸브의 개/폐 타이밍을 제어하는 능동형(active) 체크 밸브를 제안하여, 유효사이즈 17×8×11mm³의 펌프를 제작하였다. 제작된 펌프는 무부하시 토출유량 특성실험을 통하여 밸브 개/폐 타이밍 제어에 의한 유효성은 입증되었으나⁹⁾, 부하압력에 대한 토출유량 특성과 양방향 유량 특성 분석이 이루어지지 않아 여전히 연구과제로서 해결이 필요한 상태이며, 전술한 바와 같은 마이크로머신이나 마이크로팩토리 분야에 적용을 위해서도 상세한 해석이 필요하다.

본 연구에서는, 상기 펌프의 밸브 개/폐 타이밍 제어에 대한 부하 특성 및 양방향 유량 특성을 상세한 실험적 검토로 수행하였으며, 또한 얻어진 결과에 기초하여 흡입측 및 토출측 체크 밸브의 밸브 액추에이터(가동부)를 일체화한 능동형 셔플 밸브를 제안함과 동시에 소형화를 의도한 10×10×10mm³ 크기의 새로운 마이크로 펌프를 설계, 제작하여 특성실험을 수행하였다.

2. 펌프 시제품의 특성실험

2.1 구조 및 동작원리

제안한 능동형 체크 밸브를 이용하여 제작한 공진구동형 압전 마이크로펌프 시제품의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 수 kHz의 비교적 높은 구동 주파수를 가지는 공진구동형 압전 마이크로펌프의 응답에 추종시키기 위해서 고응답 적층형 압전 액추에이터의 출력변위를 직접 체크 밸브의 개/폐에 이용하고 있으며, 중앙부에 나타낸 펌프 구동부의 공진에 의한 펌프실의 용적변화에 대하여 흡입 및 토출측의 체크 밸브의 개/폐 타이밍을 능동적으로

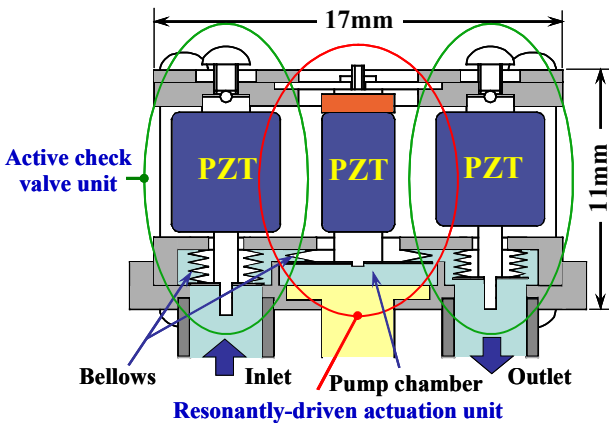


Fig. 1 Schematic of the resonantly-driven piezoelectric micropump using active check valves

제어하는 구조이다. 압전 액추에이터를 이용한 능동형 체크 밸브는 밸브장착 서브플레이트에 접촉하는 원판형상의 밸브 액추에이터의 직경을 크게함으로써 밸브 개구면적의 확대를 꾀하고 있고, 압전 액추에이터가 작동유체에 직접 접촉하는 것을 방지하기 위하여 벨로우즈를 사용하여 밀봉하고 있다. 또한 능동형 체크 밸브의 상부측은 나사에 의해서 높이의 조정이 가능하도록 하였고, 압전 액추에이터가 최대변위가 되었을 때에 체크 밸브가 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 조정하여 제작한 시제품 펌프의 유효사이즈는 17×8×11mm³이다.

2.2 실험장치

밸브 개/폐 타이밍 제어에 대한 무부하시의 주파수-유량 특성 및 부하 특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 시제품 펌프에 사용된 압전 액추에이터(펌프 구동부: 1개, 흡입 및 토출측 능동형 체크 밸브부: 2개)는, 독일 PIEZOMECHANIK의 PSt150/2×3/5 (3×4.5×5 mm³, 5.5μm@150V)이다. 신호발생기로부터 출력된 전압을 컴퍼레이터(comparator)와 D 플립플롭(flip-flop) 소자를 이용한 위상천이용 전자회로를 통해서 일본 (주)MESTEK의 고출력증폭기(M-2643, 3 채널 모드시 출력 1.5A)로 150V_{p-p}까지 증폭하여 3개의 압전 액추에이터에 각각 인가한다. 펌프실 구동용 전압과형에 대해서 흡입측 능동형 체크 밸브에서는

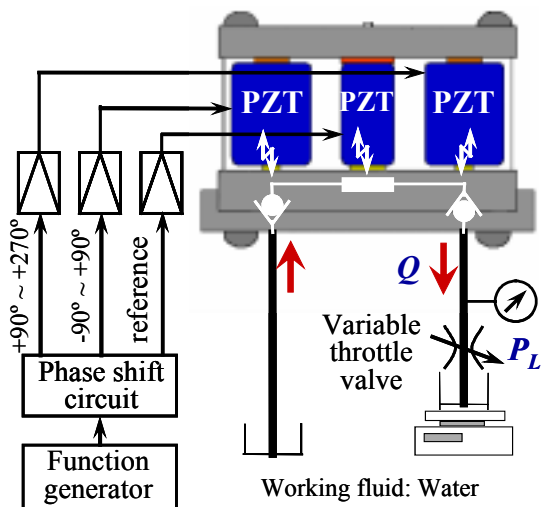


Fig. 2 Experimental apparatus

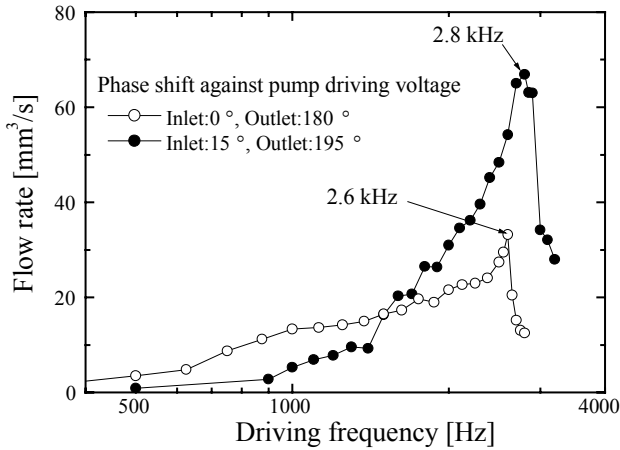


Fig. 3 Frequency characteristics of the flow rate with check valve timing control when load pressure is zero

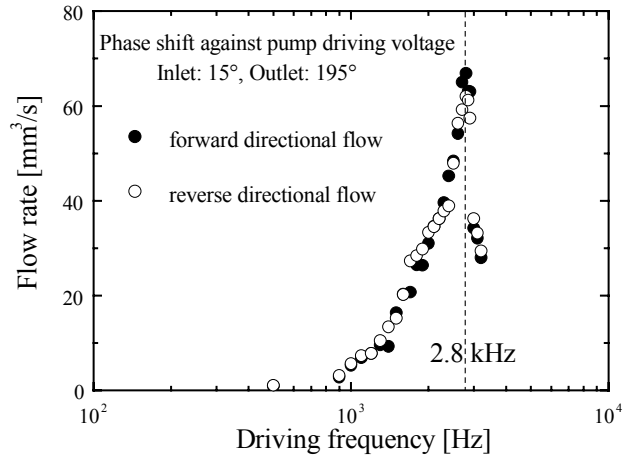


Fig. 5 Bi-directional frequency characteristics of the flow rate when load pressure is zero

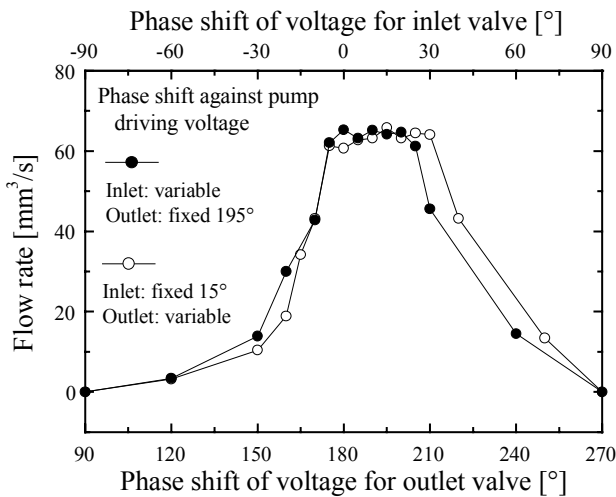


Fig. 4 Measured flow rates with check valve timing control when load pressure is zero

-90°에서 +90°까지, 토출측 능동형 체크 밸브에서는 +90°에서 +270°까지 독립적으로 위상을 변화시킴으로써, 능동적으로 밸브 개/폐 타이밍 제어를 수행한다. 작동유체에는 기포를 제거한 수도수(tap water)를 사용하였다. 부하압력은 토출포트에 연결된 가변교축기를 조정하여 인가하고 압력계로 측정한다. 무부하시의 주파수-유량 특성에 있어서는 가변교축기가 완전히 열린 상태에서 유량은 단위 시간당 유출한 물의 질량을 밀도로 나누어 구하였다.

2.3 무부하시의 토출유량 특성

주파수-유량 특성의 실험결과를 Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 처음에는 흡입측 능동형 체크 밸브의 개/폐 타이밍을 펌프실 구동의 수축/신장 타이밍에 일치시켜 실험을 하였고, 흡입측과 토출측 능동형 체크 밸브에 인가하는 전압의 위상차는 180°로

고정하였다. Fig. 3에 보여지는 실험결과로부터 구동 주파수 2.6kHz에서 최대유량 33 mm³/s가 얻어지는 것을 알 수 있다. 이전의 결과⁹⁾(구동주파수 4.6kHz에서 최대유량 52mm³/s)에 비교하면 유량이 감소하는데, 이것은 펌프를 새롭게 제작할 때 발생한 펌프 구동부의 낮은 강성이 원인이라고 생각되어진다. 정밀하게 조립하면 토출유량 특성이 향상될 수 있으나, 본 연구에서의 실험 여건상 시제품 펌프를 사용할 수 밖에 없는 상황이었다.

다음에 흡입측과 토출측의 인가전압 위상차를 180°로 고정하고, 펌프실 구동 전압파형에 대하여 흡입측 능동형 체크 밸브의 개/폐 타이밍을 제어하여 실험을 하였다. 그 결과 흡입측에서 15°, 토출측에서 195°의 위상을 지연시켰을 때에 구동 주파수 2.8kHz에서 최대유량 65mm³/s가 얻어졌고, 이전의 연구결과⁹⁾와 비슷하게 토출유량이 현저히 증가하는 경향이 확인되었다.

이상의 결과에 기초하여 능동형 체크 밸브를 최적으로 구동할 수 있는 위상차를 구하기 위하여 흡입측 또는 토출측 능동형 체크 밸브의 위상차를 15° 또는 195°로 고정하여 토출측 혹은 흡입측 인가전압의 위상을 각각 변화시켜서 실험을 하였다. 이 두개의 결과를 종합하여 Fig. 4에 나타낸다. 15° 또는 195°의 앞뒤 10° 이내의 위상변화 영역에서는 거의 동등의 유량이 얻어져, 펌프실 구동 전압파형에 대하여 흡입측 및 토출측 능동형 체크 밸브의 구동에 적절한 위상 범위가 존재한다는 것을 알 수 있었다. 또한 두개의 유량 특성이 거의 비슷한 경향을 나타내고 있는 걸로 보아서 위상을 역전시킨 역방향 유동에 있어서도 그다지 큰 영향은 없을 것으로 예측되어진다.

2.4 양방향 유량 특성

Fig. 2 에 나타난 흡입측 및 토출측 능동형 체크 밸브의 위상을 역전시켜 무부하시의 주파수-유량 특성의 실험을 하였다. 이 실험에서의 위상차는 전절에서 최적으로 구해진 흡입측 15°, 토출측 195°를 사용하였으며, 실험결과를 Fig. 5 에 도시하였다. 또한, 비교분석을 위해서 순방향 유량 특성의 실험결과도 같이 나타내고 있다. 양방향 유량 특성에 있어서 최대유량이 얻어지는 구동 주파수는 똑 같은 2.8kHz 이고 주파수에 대한 유량 특성은 거의 일치하고 있다. 이후 양방향의 부하 특성에 관한 검토도 필요하지만 이상의 결과를 종합해보면 밸브 개/폐 타이밍 제어에 대한 능동형 체크 밸브의 타당성이 확인되었다 할 수 있다.

2.5 부하 특성

부하압력에 대한 토출유량 특성을 구하였다. 구동

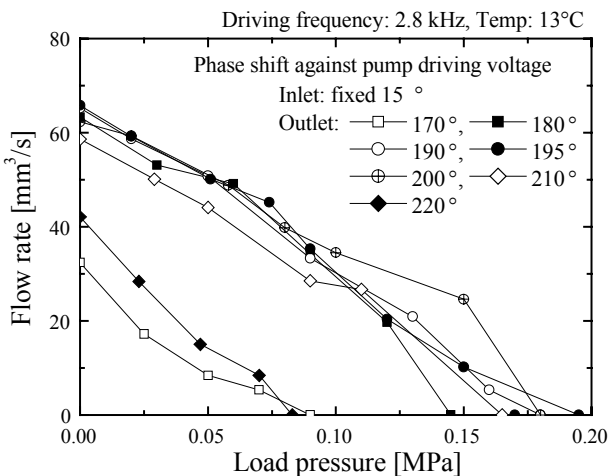


Fig. 6 Load characteristics with variable phase shift of active check valve in outlet

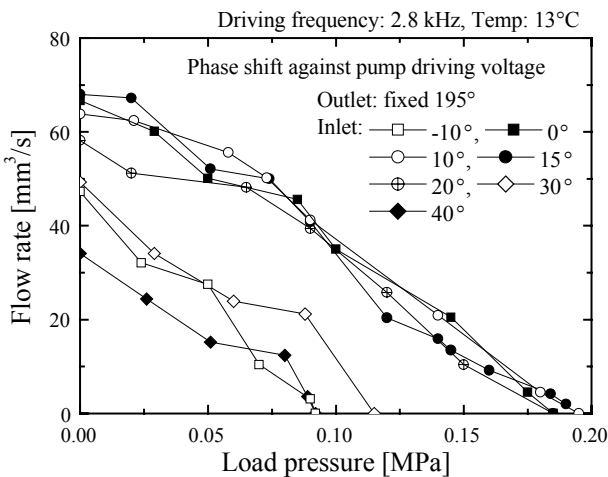


Fig. 7 Load characteristics with variable phase shift of active-type check valve in inlet

주파수는 무부하시의 특성실험에서 최적으로 구해진 2.8kHz 이다. 펌프실 구동 전압과형에 대하여 흡입측 능동형 체크 밸브의 위상차를 15°로 고정하고 토출측의 위상을 변화시켰을 때의 실험결과를 Fig. 6 에, 토출측 능동형 체크 밸브의 위상차를 195°로 고정하고 흡입측의 위상을 변화시켰을 때의 실험결과를 Fig. 7 에 나타낸다. 두 결과에 있어서 최대압력은 약 0.2MPa, 최대유량은 약 65mm³/s 이고 부하압력과 유량의 곱으로 구해지는 최대출력과위는 3.8mW 이며 양방의 실험결과에 그다지 큰 차이는 보이지 않는다.

또한 무부하시의 토출유량 특성의 실험결과와 유사하게 흡입측 또는 토출측 능동형 체크 밸브의 위상차를 15° 또는 195°로 고정했을 때에 토출측에서는 195°, 흡입측에서는 15°의 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 체크 밸브의 위상차를 180°로 고정한다면 고출력의 펌프성능을 유지하면서 흡입측 및 토출측 능동형 체크 밸브의 밸브 액츄에이터를 일체화하는 것이 가능하므로 한층 더 펌프의 소형화가 실현 가능하다고 할 수 있다.

3. 능동형 셔틀 밸브를 이용한 펌프

3.1 능동형 셔틀 밸브의 제안

전술한 실험결과에 기초하여, 흡입측 및 토출측 능동형 체크 밸브의 밸브 액츄에이터를 일체화한 새로운 구동원리의 능동형 셔틀 밸브를 제안한다. Fig. 8 (a), (b)에 유공압 분야에서 흔히 사용되어지는 셔틀 밸브의 간략기호를 나타낸다. 강구(steel ball)와 같은 밸브 액츄에이터에 의해서 두개의 유로를 압력에 의해 선택해, 항상 고압측 혹은 저압측만의 관로를 접속시키는 구조이다. 한편 Fig. 8 (c)에 나타난 바와 같이 제안하는 능동형 셔틀 밸브

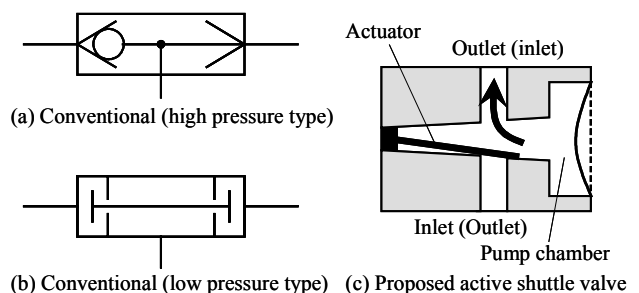


Fig. 8 Proposition of a sheet-type active shuttle valve

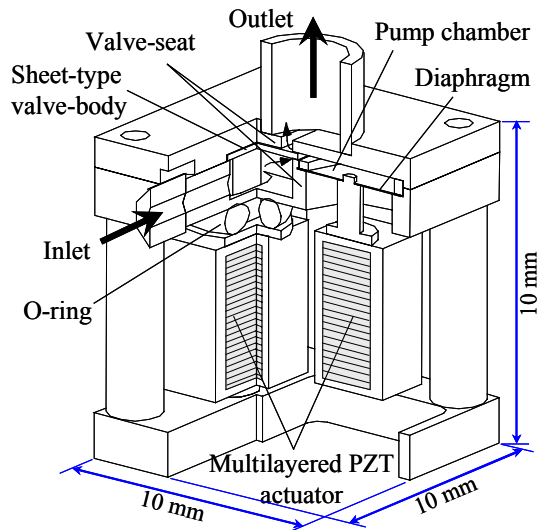


Fig. 9 Schematic of the fabricated micropump using a sheet-type active shuttle valve

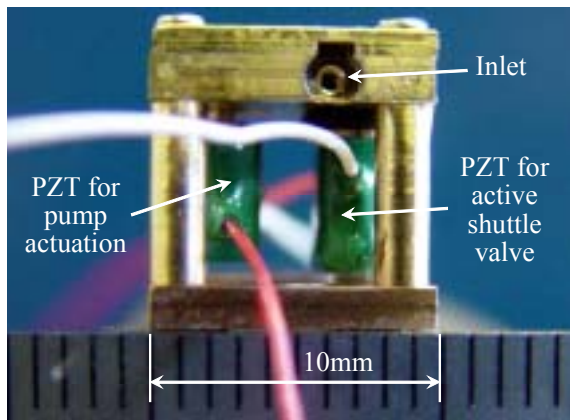


Fig. 10 Photocopy of the fabricated micropump

는 펌프실 내부의 용적변화에 따라서 밸브 액추에이터를 능동적으로 제어하여 작동유체의 흡입시에는 토출측 체크 밸브의 역할을, 작동유체의 토출시에는 흡입측 체크 밸브의 역할을 수행한다. 구조가 간단하고 더욱이 펌프실 용적변화에 대하여 밸브 액추에이터의 동작을 역전시키는 것만으로도 역방향 유동이 가능하기 때문에 응용범위는 매우 넓다고 할 수 있다.

3.2 펌프의 제작과 특성실험

제안한 능동형 셔틀 밸브를 이용하여 소형화를 목적으로 새로운 마이크로펌프를 제작하였다. 펌프의 개략도를 Fig. 9 에, 사진을 Fig. 10 에 나타내었다. 펌프 시제품의 유효사이즈는 10×10×10mm³이다. 최대유량 400mm³/s, 펌프실 구동부의 공진 주파수 3.0kHz 를 설계사양으로 하였다. 펌프실 및 능동형 셔틀 밸브의 구동에는 제 2 장에서 사용된 적층형 압전 액추에이터와 같은 재원을 사용하고

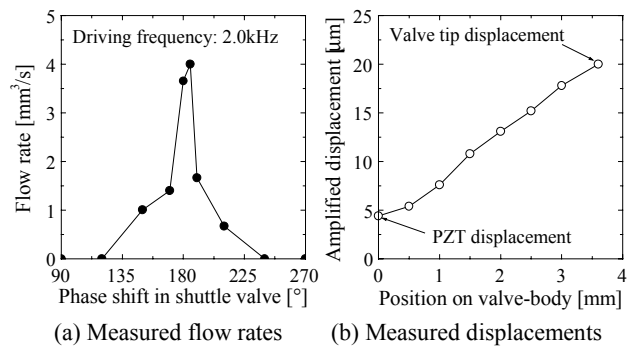


Fig. 11 Experimental results of the fabricated micropump using active shuttle valve

있다. 밸브 개구면적의 증대를 피하기 위해서 지렛대의 원리를 사용하여 압전 액추에이터의 변위를 능동형 셔틀 밸브의 밸브 액추에이터의 자유단 변위에 있어서 9 배 증폭시키는 구조이다. 펌프실의 용적변화를 일으키는 다이어프램은 두께 0.03mm, 유효직경 3.8mm 이다. 능동형 셔틀 밸브의 밸브 액추에이터의 재질은 스테인리스이고 폭 3.2mm, 길이 3.62mm, 두께 0.2mm 이다. 간단한 계산에 의해서 구해진 고유 진동수는 38kHz 이고 펌프실의 용적변화에 고응답으로 추종 가능하다고 생각되어진다.

제작한 펌프를 사용하여 무부하시에 있어서 밸브 개/폐 타이밍 제어에 의한 토출유량 특성실험을 하였으며, 그 결과를 나타내면 Fig. 11 (a)와 같다. 제안한 능동형 셔틀 밸브의 작동에 의한 펌핑은 확인되고 있으나, 수 mm³/s 의 미소유량밖에 얻어지지 않는 것을 알 수 있다. 원인으로서는 Fig. 11 (b)에 나타낸 바와 같이 셔틀 밸브의 밸브 액추에이터의 변위가 설계치(40μm)의 절반밖에 얻어지지 않아 토출측 밸브로부터 누설이 발생했기 때문으로 생각되어진다. 이후 밸브 액추에이터의 재설계에 의해서 누설유량을 저감한다면 펌프 출력의 증대가 기대되어진다.

4. 결론

본 연구에서는 압전 액추에이터에 의해서 능동적으로 체크 밸브의 개/폐 타이밍을 제어하는 능동형 체크 밸브를 이용한 공진구동형 압전 마이크로 펌프의 양방향 유량 특성 및 부하 특성 등의 상세한 실험적 검토를 하여, 펌프 구동부의 용적변화에 대하여 흡입 및 토출측 능동형 체크 밸브에 인가하는 전압파형의 특정 위상차에 있어서 토출유량이 현저히 증가한다는 점과 고출력의 부하 특성을 나타낸다는 점 등을 확인하였다. 또한 얻어진 실험결과에 기초하여 흡입측 및 토출측 능동

형 체크 밸브의 밸브 액츄에이터를 일체화한 능동형 셔틀 밸브를 제안함과 동시에 소형화를 꾀한 $10 \times 10 \times 10 \text{mm}^3$ 크기의 새로운 동작 원리의 마이크로 펌프를 설계, 제작하여 특성실험을 하였다.

본 연구에서 수행되어진 고출력 마이크로펌프와 같은 새로운 유체기계요소는 마이크로 공작기계와 인간친화형 지능로봇 등의 분산 유체동력원으로서의 응용이 기대되어진다. 이러한 분야의 연구는 마이크로 액압제어 서보(servo) 시스템 또는 바이오 메카트로닉스 분야의 요소기술을 확립함과 동시에 유체제어공학 및 로봇공학 등의 새로운 응용 분야 개척에 많은 도움이 될 수 있으리라 본다.

참고문헌

- (1) TAKEDA Munehisa, 2001, "Applications of MEMS to Industrial Inspection", Proc. MEMS2001, pp. 182-191.
- (2) GAUGEL Tobias, et al., 2002, "Building a mini-factory from a technology construction kit", Proc. 3rd International Workshop on Microfactories", pp. 5-8.
- (3) YOSHIDA Kazuhiro, TAKAHASHI Ken and YOKOTA Shinichi, 2000, "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.
- (4) YOSHIDA Kazuhiro, PARK Jung-Ho, SHIMIZU Takayuki and YOKOTA Shinichi, 2001, "A Micropump-Mounted In-Pipe Mobile Micromachine Using Homogeneous Electro-Rheological Fluid", Proc. 3rd IFToMM International Micromechanisms Symposium, pp. 2-7.
- (5) YOSHIDA Kazuhiro and YOKOTA Shinichi, 1993, "Study on High-Power Micro-Actuator Using Fluid Power", Proc. FLOMEKO'93, Vol.1, pp. 122-130.
- (6) PARK Jung-Ho, YOKOTA Shinichi and YOSHIDA Kazuhiro, 2002, "A Piezoelectric Micropump Using Resonance Drive with High Power Density", JSME International Journal (Ser.C), Vol.45, No.2, pp. 502-509.
- (7) PARK Jung-Ho, YOSHIDA Kazuhiro and YOKOTA Shinichi, 1999, "Micro Fluid Control System Using Homogeneous ER Fluids (Proposition of micro ER valve and basic experiments)", Proc. IROS'99, Vol.2, pp. 1063-1068.
- (8) PARK Jung-Ho, YOSHIDA Kazuhiro and YOKOTA Shinichi, 1999, "Resonantly Driven Piezoelectric Micropump (Fabrication of a micropump having high power density)", MECHATRONICS, Vol.9, No.7, pp. 687-702.
- (9) PARK Jung-Ho, YOSHIDA Kazuhiro, IGARASHI Kouichi, YOKOTA Shinichi, SETO Takeshi and TAKAGI Kunihiko, 2002, "A Resonantly-Driven Piezoelectric Micropump Using Active-Type Check Valves", Proc. 2002 JSME Annual Meeting, pp. 253-254.