

밸브리스 압전펌프 연동구동 제어기 설계

조정대*, 박경민, 노종호, 함영복(한국기계연구원, 첨단산업기술연구부), 유진산(한독 하이드로릭)

Design of Multi-Phase Shift Controller for Valveless PZT Pump

Jeongdai Jo, Kyung-Min Park, Jong-ho Noh, Young-Bog Ham (KIMM), and Jinsan Yoo(Handok Hydraulic Co.)

ABSTRACT

The high voltage driving system with multi-phase shifter including piezoelectric actuators comprised a driving power unit for outputting the driving power by converting input alternate current into direct current, a frequency shifting unit for supplying the direct current power and shifting or generating a frequency, a high-voltage amplification unit for amplifying the input signal outputted from the driving power unit and the frequency shifting unit into a high-voltage signal, and a phase shifting unit for shifting the phase difference of the amplified signal applied to the high-voltage amplification unit and driving plural piezoelectric actuators sequentially. The results that the operating voltage was stable, the voltage loss ratio was low and the response velocity was fast could be obtained. An experiment on performance of the high voltage driving system with multi-phase shifter designed and manufactured as above described was conducted by using a piezoelectric pump having 3 sheets of round unimorph piezoelectric actuators laminated respectively in a rectangular case. It sucks any fluid by causing the first piezoelectric actuator to shift from the inlet porter side, the phase delay of 60° causes the second piezoelectric actuator to begin to shift, and the phase delay of 120° causes the third piezoelectric actuator to begin to shift. As a result of measuring each change in the outlet flow rate of the piezoelectric pump, it was shown that the frequency-flow rate characteristic, the voltage-flow characteristic, and the load pressure-flow rate characteristic were improved.

Key Words : 연동제어(sequence control) 위상가변기(phase shifter), 압전펌프(PZT Pump), 압전액츄에이터(piezoelectric actuator), 연동파형, 고전압증폭기

1. 서 론

산업분야에서 다양한 유체 이송이 가능한 펌프를 구성하는 방법으로써 압전소자의 압전효과를 이용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1] 압전액츄에이터(piezoelectric actuator)를 이용한 펌프에서는 큰 발생력, 큰 변위 특성, 정밀도와 우수한 반응 속도를 얻기 위한 고전압용 제어 시스템이 필요하다. 저전력 구동을 위한 회로가 아닌 고전력을 필요로 하는 부하 회로에서는 범용 연산증폭기를 사용하면 전격보다 큰 전력으로 인하여 정상적인 동작을 할 수 없을 뿐만 아니라 소자의 파괴를 가져온다.[2] 본 연구에서는 고전압 구동이 가능하고 고전류를 출력할 수 있도록 회로를 구성하였고, 구동전압이 200V 이상인 경우에도 안전한 출력을 낼

수 있도록 회로를 설계 및 제작하였다. 하나 또는 다수개의 압전액츄에이터로 구성된 시스템에서 구동 효율을 높이는데 직접적인 영향을 미치는 고정 밀도와 빠른 응답 특성을 구현하기 위하여, 입력전압에 대하여 출력전압이 선형적으로 추종하고 주파수 가변이 0° 에서 180° 까지 독립적이며 순차적으로 제어가 가능한 위상가변(phase shifting)형 압전액츄에이터 구동장치를 설계하였다. 구동신호를 증폭 및 가변하는 고전압 증폭 구동장치는 압전액츄에이터 구동에 직접 영향을 주게 되므로, 이의 특성인 고주파에서의 위상 지연 보상, 높은 회전비(slew rate)로 고전압에서의 정현파의 찌그러짐을 방지, 전압 이득의 가변 및 안정화, 입력 및 출력 임피던스의 개선, 주파수 대역폭(band width)의 확장이 매우 중요하다.[3]

설계 및 제작된 연동파형(multi-phase shifting) 고

전압증폭 구동장치의 성능 실험은 원형 유니몰프(unimorph) 압전액추에이터 3 장을 사각의 케이스 내에 적층하여 압축과 팽창으로 상·하 힘 운동하는 압전펌프(piezoelectric pump)에 응용하였다.

이러한 압전액추에이터를 이용한 펌프는 미세 유량 제어장치, 미생물 조작 장치 등의 제작을 가능하게 하여 고정밀을 필요로 하는 측정 계기와 장치, 치료기구 등에 응용이 가능하다.

2. 연동구동 제어기 설계

압전액추에이터의 연동파형 고전압증폭 구동장치는 입력되는 교류를 직류로 변환하여 구동전원을 출력하는 구동전원부, 주파수를 발생 및 가변시키는 주파수발생부, 구동전원부와 주파수발생부의 출력신호가 입력되면 고전압으로 증폭하는 전압증폭부, 전압증폭부로 인가되는 증폭신호의 위상차를 제어하여 다수개의 압전액추에이터를 순차적으로 구동시키는 위상가변부를 포함하며 Fig. 1 과 같이 구성하였다. 입력전압에 대하여 출력전압이 선형적으로 추종하고 주파수 가변이 독립적이며 순차적으로 제어가 가능하게 설계하였다.

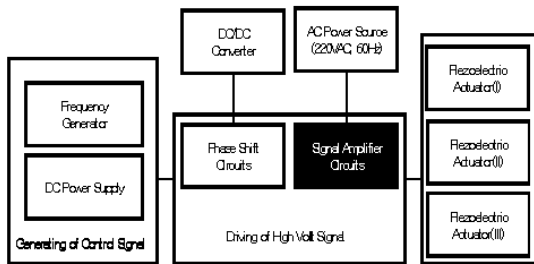


Fig. 1 Schematic diagram of high voltage driving unit with multi-phase shifter

파형 크기(amplitude)의 변화가 없이 가변 위상 응답이 가능하고 정현파 입력신호(sine wave)의 위상을 연동하여 제어할 수 있는 회로를 Fig. 2 에 나타내었다. 첫 단의 연산증폭기(OP Amp)는 단위이득(unit gain) 증폭부로 저항 R1 다음을 접지(ground)와 연결하여 출력 파형을 반전 또는 비반전 회로의 기능을 가졌으며, 두번째 단의 연산증폭기 회로는 C1 과 VR1의 시정수 값에 의해 입력되는 파형의 위상이 0°에서 180°로 가변 된다.

위상가변 회로에 대한 전달함수는 수식 (1) 과 같다.

$$\frac{V_o}{V_I} = \frac{s - \frac{1}{VR_1 C_1}}{s + \frac{1}{VR_1 C_1}} \quad (1)$$

C1 과 VR1 에 의한 위상지연을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Phase(rad) = \tan^{-1} \frac{\frac{2\omega}{VR_1 C_1}}{\omega^2 - \left[\frac{1}{VR_1 C_1} \right]^2} \quad (2)$$

위상지연의 가변은 1° 단위로 제어가능하며, 0°, 60°, 120°, 및 180° 의 위상을 갖는 연동파형제어기는 Fig. 3 과 같다.

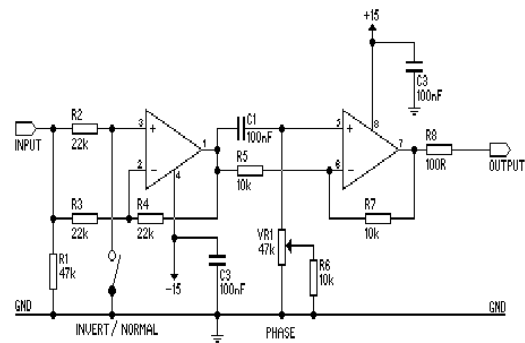


Fig. 2 Schematic of phase shift circuit

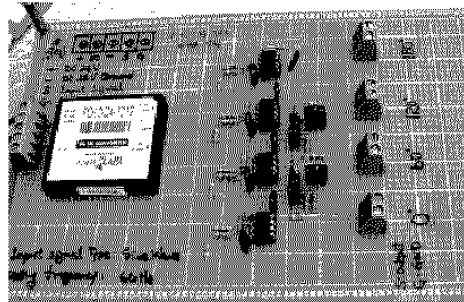


Fig. 3 Photographic of phase shift controller

연동파형을 고전압으로 증폭기 위한 구동장치는 집적회로(integrated circuits) 구성하여 구조를 간단하게 하였으며, 정류된 DC 전원과 0V 에서 10V 의 가변 전압을 고전압증폭기의 입력전압으로 하여 0~200V 의 선형적으로 주파수 가변이 가능하도록 출력 전압을 제어하였다. 위상가변기와 압전액추에이터와 구동장치간의 임피던스차로 인한 전압강하와 신호의 찌그러짐의 방지, 입력 및 출력 임피던스의 개선을 위하여 임피던스정합기를 입력단과 출력단에 설계하였다. 전원 차단시 압전액추에이터에 충전된 전하를 고속으로 방전시키기 위한 회로를 설계하여 전원차단 시간지연(off time delay)을 최소화하여 응답속도와 동작특성을 향상 시켰다.

제작된 연동파형 고전압증폭 구동장치를 Fig. 4에 나타내었으면, 전압이득(gain)은 96.2%이고 오프셋(offset) 0.186의 특성을 보였다.

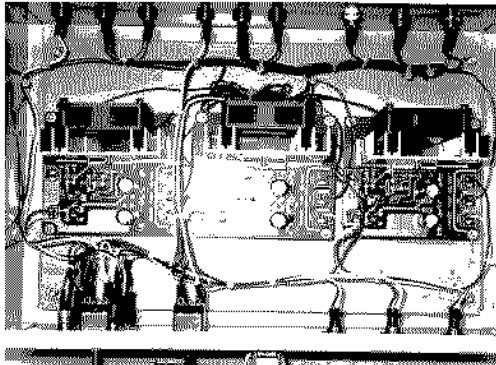


Fig. 4 Schematic diagram of high voltage driving unit with multi-phase shifter

3. 벨브리스 압전펌프구동

본 연구의 압전 액추에이터의 구조는 두께가 0.2mm, 지름이 40mm 과 황동 판(shim)의 두께가 0.15mm, 지름이 50mm 이며, 황동 판에 압전세라믹을 접착하고 전극이 적층된 형태로 설계하였으며, 공급된 전원의 극성에 따라 압전액추에이터의 확장과 수축이 일어나게 된다.[4] 유체의 접촉을 막기 위해 실리콘이 몰딩된 구조로 Fig. 5와 같이 제작하였다.

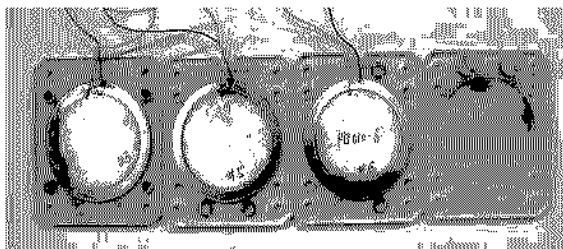


Fig. 6 Photo image of unimorph type piezoelectric actuator

압전 액추에이터에 200V의 전압에서 주파수를 가변하여 인가하였을 때의 변위는 100Hz 이하에서는 변화가 없었으며, 100Hz 이상에서 주파수가 증가할수록 변위가 급격하게 감소함을 알 수 있었다. 최대 변위는 전압 200V와 60Hz에서 310 μm였고 발생력은 170 gf를 나타내었다.

설계 및 제작된 연동파형 고전압증폭 구동장치는 압전액추에이터 3장을 사각의 케이스 내에 적층하여 결합한 압전 펌프에 응용하였다. 사각 케이스

내에는 유체를 유입 및 토출할 수 있는 유로를 형성시키고 마지막 액추에이터 케이스에는 첫 번째 액추에이터 케이스까지 직접 연결될 수 있도록 유로를 형성시켜 흡입포터와 토출포터가 나란히 배치될 수 있도록 하였다. 미소량의 유체를 이송하기 위한 압전펌프를 연동하여 구동하는 방법은 흡입측으로부터 첫 번째 압전 액추에이터가 변위를 일으켜 유체를 흡입하면, 60°의 위상지연으로 두 번째 압전 액추에이터가 변위를 일으키고, 120° 위상지연으로 세 번째 압전 액추에이터가 변위를 시작하는 동작을 수행하며, 압전 액추에이터 위상지연에 따른 변위에 의해 발생된 공간에 유체가 유입되어 출구 측으로 밀려 토출하는 연동 구동하여 순차적으로 유체를 일정한 방향으로 흐르게 하였다. 압전 펌프는 체크 밸브 없는 간단한 구조로 유체를 단속할 수 있으며, 부품수가 적으므로 고장이나 수리가 자주 발생하지 않을 뿐만 아니라 체크 밸브가 동작하는 소음이 없으므로 저소음화를 구현할 수 있었다. Fig. 6은 6상으로 구동되는 연동형 압전펌프의 구동원리를 나타낸 것이다.

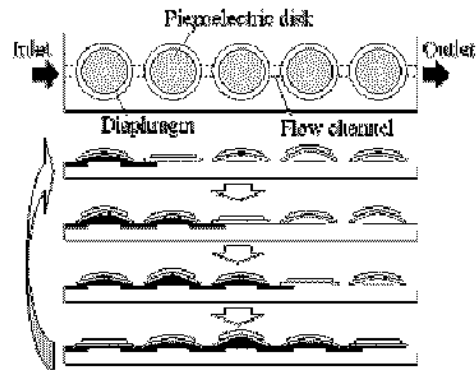


Fig. 6 Principle of a multi-phase shifting for pumping

4. 실험 및 결과

압전 액추에이터 연동파형 고전압증폭 구동장치의 성능평가를 위하여 전압 및 주파수에 대한 제어기 성능, 변위 및 발생력 특성실험과 압전펌프의 유량을 측정하고 최대유량에 대한 조건을 구하였다.

연동파형 제어기의 성능평가를 위하여 Fig. 2의 회로를 이용하여 입력신호는 60Hz의 정현파, 진폭은 3V와 Offset은 3V 조건에서 가변저항을 가변하며 1° 단위의 위상변화를 시뮬레이션 하였다.

연동파형 고전압 증폭 구동장치의 출력 전압 특성을 실험한 결과, 주파수 제어 범위는 10~200Hz, 출력 전압은 40~230V의 출력 특성을 나타내었다. 소비 전력 실험에서는 약 3.3W의 출력과 약 20mA

소비전류가 측정 되었다. Fig. 8 은 0V 에서 10V 의 가변전압과 60Hz 의 주파수 조건에서 0°, 60°, 120° 및 180° 위상지연을 실험한 결과이다. 고전압 증폭 구동장치를 이용하여 펌프에 장착된 압전액츄에이터의 변위 측정 한 결과, 최대변위는 202.4 μm 였고 히스테리시스 는 2.6%이내였으며, 가변전압에 대한 변위 측정시험 결과는 Fig. 9 에 나타내었다.

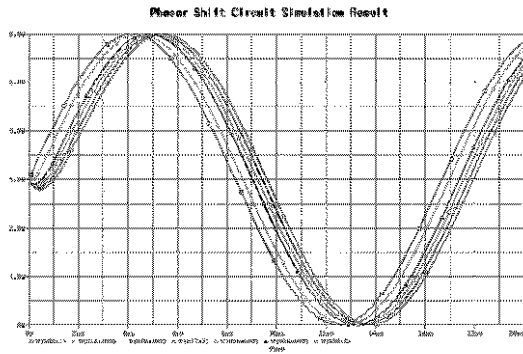


Fig. 7 Result of phase shift simulation

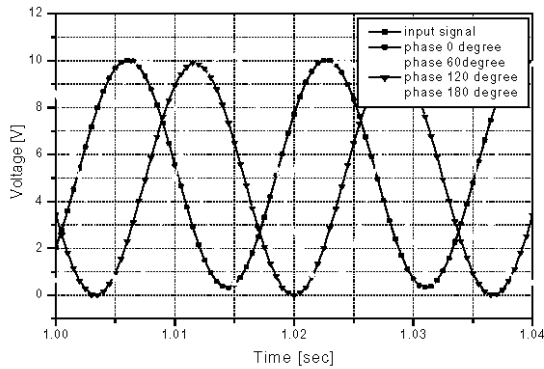


Fig. 8 Result of phase shift test at 60Hz, and 10Vp-p

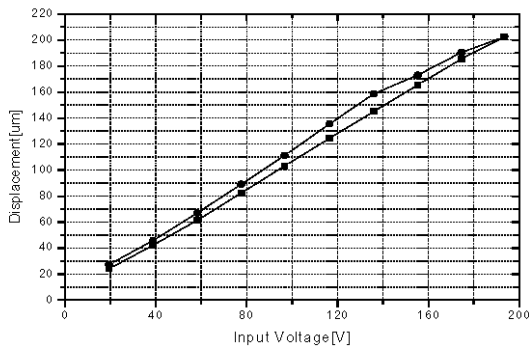


Fig. 9 Result of displacement test for PZT actuator

4. 결론

본 연구에서는 출력단에 연결되어 있는 부하가 동작하는 구동전압과 같은 고전압에서 동작 가능하고 안정한 연동과형 고전압증폭 구동장치를 설계 및 제작하였고, 압전펌프에 응용하여 동작특성 실험과 성능측정 실험을 수행하였다. 개발된 연동과형 고전압증폭 구동장치는 입력전압에 대해 출력전압 이득이 96.2%로 선형적이었고, 60°, 120° 및 180°의 위상가변이 가능하였으며, 제어정밀도는 1°였다. 또한, 동작전압이 안정적이며, 전압 손실비가 낮고, 응답속도가 빠르다는 결과를 얻을 수 있었다. 연동과형 고전압증폭 구동장치를 이용한 압전액츄에이터의 성능실험에서 최대변위는 202.4 μm (200V), 히스테리시스 는 2.6% 이내의 특성을 보였다. 압전펌프의 토출유량에 대한 변화를 측정 한 결과 주파수-유량 특성 및 전압-유량특성이 향상되었다. 본 연구 결과를 압전펌프 및 응용장치에 실용화하기 위해서는 장치의 성능, 신뢰도, 수명과 재료의 적합성 등에 관한 문제가 해결되어야 한다.

참고문헌

1. Jeongdai Jo et al, "High Voltage Driving Unit and Method with Multi-Phase Shifter for Piezoelectric Actuator", Patent No. 2004-18744, 2004.
2. Jeongdai Jo, et al, "Design and Implementation of High Voltage Driving Unit with Multi-Phase Shifter for Piezoelectric Actuator", *Proc. of the KSPE 2004 Spring Conf.*, pp.1090-1093, 2004.
3. Kee Eun Kim, et al, "Design and Realization of High Voltage Operational Amplifier", *Proc. of KIEE 2002 Spring Conf.*, pp517~520, 2002.
4. Y.B. Ham, et al, "Development of Piezoelectric Pump for Microfluid Delivery", *Proc. of the KFPS 2003 Conf.*, pp.117-122, 2003.