

마이크로 용적형 수차의 개발에 관한 연구

최영도† · 이영호*

(원고접수일 : 2005년 12월 16일, 심사완료일 : 2006년 2월 9일)

A Study on the Development of a New Micro Positive Displacement Hydraulic Turbine

Young-Do Choi† and Young-Ho Lee*

Abstract : For the case of high head and critical low flow rate range of micro hydropower resources, it requires very low specific speed turbines which are lower than conventional impulse turbine's specific speed. In order to satisfy the request for very low specific speed turbine with high efficiency, a new positive displacement turbine is developed. The performance characteristics of the new turbine is tested and compared with a conventional impulse turbine, which is used for automatic water faucet system. The purpose of present study is to develop an high performance turbine that can be used to extract micro hydropower potential of a water supply system. The test results show that the positive displacement turbine is much more efficient than the conventional turbine and it can sustain high efficiency under the wide range of operating conditions. The pressure pulsations at the inlet and outlet of the positive displacement turbine can be considerably minimized by using simple pressure damper.

Key words : Micro hydropower(마이크로 수력), Positive displacement hydraulic turbine(용적형 수차), Impulse turbine(충동 수차), Water supply system(상수도관로), Pressure pulsation(압력맥동)

기호설명

B	: 로터의 높이, m	n	: 회전수, min^{-1}
D	: 로터의 직경, m	n_s	: 비속도, m.kW.min^{-1}
f	: 주파수, Hz	N_u	: 단위속도
H	: 유효낙차, m	p	: 압력, MPa
LON	: 로브의 개수	P	: 출력, W
		P_u	: 단위출력
		Q	: 유량, m^3/s

† 책임저자(요코하마국립대학 대학원 공학연구원), E-mail: ydchoi@mach.me.ynu.ac.jp, Tel: +81-45-339-3903

* 한국해양대학교 기계정보공학부

- T : 토크, Nm
- V_d : 체적변위, m^3/rad
- n : 효율
- ρ : 밀도, kg/m^3
- ω : 각속도, rad/s

1. 서 론

발전용량이 100kW 이하인 마이크로 수력자원은 일상생활에서 우리 주위의 하천, 마을의 상수도관로, 가정으로부터의 배수로, 관개시설 등에 널리 분포하고 있으며, 대부분이 유효하게 사용되지 않은 채 버려지고 있다. 그 중에서 발전설비의 제작 및 설치비용이 상대적으로 적게 들고 실용화하기에 기술적으로 가장 적합한 마이크로 수력발전 시스템이 상수도관로를 이용하는 것이다^[1]. 이 발전시스템은 수차를 관로에 설치하는 것만으로 운전이 가능하므로, 대규모 토목공사를 할 필요가 없다.

한편, 마이크로 수차에 대한 최근의 활발한 연구 개발의 결과 여러 종류의 수차가 마이크로 수력자원으로부터 에너지를 뽑아내기 위해서 사용되어 오고 있으며^[2)-(4], 어느 특정지역에 대해서 가장 적합한 수차의 선정은 그 지역의 특성 즉, 사용 가능한 낙차 및 유량 등의 지배적인 요인에 크게 의존하게 된다^[4]. 고낙차이고 현저하게 저유량인 마이크로 수력자원의 경우 극저비속도 수차가 필요하며, 종래로부터 사용되어 온 충동수차가 그 범위에 들어간다. 특히, 이러한 충동수차 중에서 펠톤수차는 현재까지 저비속도 영역인 고낙차 및 저유량의 운전 조건에 최적인 수차로서 알려져 있지만, 극저비속도 영역에서는 펠톤수차에 해당하는 비속도 영역보다 더 낮은 비속도 영역의 운전조건이 필요하다.

일반적으로 상수도관로의 압력은 필요한 압력보다 더 높게 공급되기 때문에, 관로말단에서는 입구와 출구 사이의 높은 압력차에 의해 많은 에너지가 버려지고 있다. 우리가 수도꼭지를 한번 사용할 때마다 10~80 W의 전력이 버려지고 있으며, 이때의 비속도($n_s = nP^{1/2} / H^{5/4}$)는 3.7에 해당한다. 이 비속도에 대해서는 비속도가 가장 낮은 충동수차로도 비속도가 10-70의 영역^[4)-(6]이므로, 현재

이 영역에 적당한 수차가 없는 실정이다. 그래서, 본 연구에서는 이 비속도의 필요조건을 충족시키기 위해서 새로운 형식의 수차인 용적형 수차를 제안하려고 한다.

본 연구의 목적은 상수도 관로의 특징을 상세하게 검토하여 관로말단에서 발전 가능한 마이크로 수력 포텐셜을 예측하는 것과 함께, 단순한 구조를 가지면서도 높은 효율을 낼 수 있는 비속도가 매우 낮은 새로운 형식의 수차를 개발하는 것이다.

2. 상수도관로의 마이크로 수력 유효 이용에 대한 검토

가정 및 사무실 등에 설치되어 있는 수도꼭지로부터 흘러나오는 유량은 일반적으로 4-10 l/min이다. 이 유량은 Fig. 1 및 Fig. 2에 보이고 있는 2개의 평행한 수직 점선 사이의 범위에 해당되고, 본 연구에서 주로 검토하려고 하는 영역이다. 수도꼭지로부터 물이 나오기 위해서는 입구와 출구 사이에 작은 차압이 필요하지만, 모든 사용자들에게 물을 안정적으로 공급하기 위해서 상수도관로에서는 언제나 필요한 수압보다 높은 수압으로 물을 공급하고 있다.

본 연구에서는 한 도시의 주거지역 및 상업지역을 대상으로 하여 상수도에 대한 수압과 유량의 관계를 조사하여 그 결과를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내고 있다. Fig. 1은 실험한 수도꼭지의 압력과 유량의 관계를 보이고 있으며, 최대의 압력과 유량은 각각 0.1-0.54 MPa과 11-36 l/min의 범위에 위치해 있다. 이러한 범위는 일반적인 필요조건보다 매우 높다. 대부분의 가정에서는 배수지의 펌프로부터 보내온 물을 바로 사용하지만, 고층빌딩에서는 물을 빌딩의 최고층까지 보내기 위해서 부스터시스템 또는 펌프를 이용하여 그 물은 다시 빌딩의 각층으로 배분하여 공급하기 때문에 압력과 유량이 다양하게 분포함을 알 수 있다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 유량에 대한 압력곡선의 기울기가 모두 같지 않으며, 이러한 현상은 수도 관로의 직경이 각 조사지역에 따라 다르기 때문이라고 생각된다. Fig. 1의 데이터로부터 관로말단부의 밸브에서 이

용할 수 있는 마이크로 수력포텐셜은 $P = \rho g Q H$ 에 의해 계산하여 예측할 수 있다. 그 결과는 Fig. 2에서 나타내듯이 최대로 이용할 수 있는 수력은 10W-100W 사이이다.

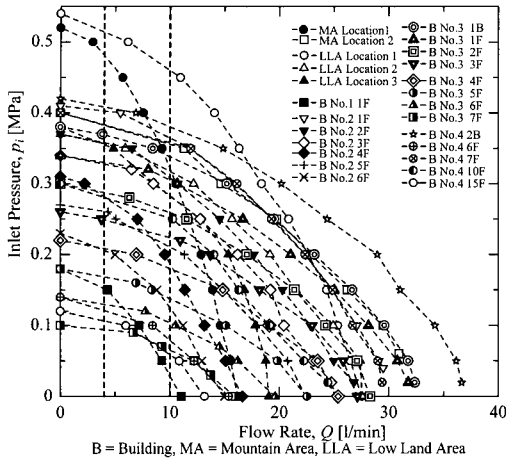


Fig. 1 Inlet pressure vs. flow rate of water faucet of water supply system

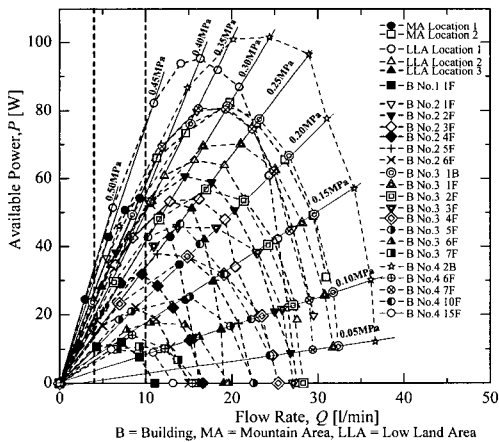


Fig. 2 Relationship of available power, flow rate and pressure in water supply system

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 3에서 본 연구에 사용된 실험장치를 보이고 있다. 급수시스템은 유량 0-60 l/min, 압력 0-0.7

MPa의 범위에서 수차의 성능에 관한 실험을 할 수 있도록 설계하였다. 물을 수조 ①로부터 다단원심 펌프 ②를 이용하여 관로를 통해서 수차까지 공급하며, 수차의 출구로부터 나온 물이 다시 수조로 돌아오는 순환식 관로로 구성되어 있다. 유효낙차 H 는 펌프의 회전수를 조절하거나 압력제어밸브 ⑫를 조절하여 변화시킬 수 있다. 수차에 공급하는 유량은 밸브 ⑥을 이용하여 조절한다. 또한, 밸브 ⑪는 토출압력을 조절하는데 사용된다.

수차의 성능측정은 실험대 ⑨에서 실시하였다. 수차의 축을 커플링에 의해 토오크 미터의 한쪽 끝단에 접속시키고, 그 토오크 미터의 반대쪽 끝단에 발전기 또는 기계식 부하를 연결시켜서 실험을 수행할 수 있다. 기계식 부하는 수차의 축계에 하중을 걸어서 측정하였다.

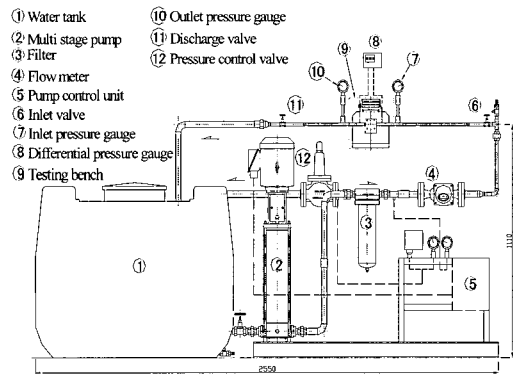


Fig. 3 Schematic view of testing system

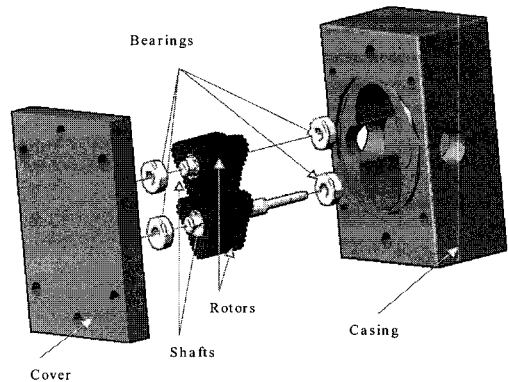


Fig. 4 Whole view of positive displacement hydraulic turbine

3.2 수차의 설계제원

Fig. 4는 마이크로 용적형 수차의 상세도를 나타낸다. 수차의 형상은 3개의 간단한 로브를 가지는 회전식 구조이며, 유체는 수압에 의해 수차의 입구로 들어간 후 수압이 수차의 출구보다 입구에서 더 크기 때문에 유체는 부하 토오크에 대해서 로터를 회전시킬 수가 있다. 수차는 2개의 로터, 2개의 축, 4개의 베어링, 케이싱 그리고 케이싱 덮개에 의해 이루어진다. 베어링에 의해 베어링 사이에 위치하는 로터의 축 양단을 지지하고 있기 때문에, 축의 휨 및 로터와 케이싱벽면과의 접촉을 막을 수 있다. 로터는 딱딱한 플라스틱으로 만들어 졌으며, 직경이 21.2 mm, 높이가 16.4 mm이다. 그리고, 로터와 축은 용수철 핀으로 견고하게 고정시켰다. 2개의 로터 사이의 토오크 전달을 개선하기 위해서 로터의 외주에 펄기어를 설치하였다. 2개의 로터에 설치된 기어는 33개의 톱니를 가지고 있다.

3.3 실험방법

일반적으로 수차는 일정한 회전수, 유량, 유효낙차, 축동력 그리고 효율로 운전하도록 설계한다⁽⁷⁾. 그러나, 수도꼭지용 마이크로 수차는 넓은 범위의 유효낙차에 대해서 좁은 범위의 유량으로 운전된다. 따라서, 일정한 유량으로 수차의 성능특성을 측정할 필요가 있다. 유량을 일정하게 유지하고, 수차에 걸리는 부하를 변화시킴에 의해 회전수를 바꾸어 가며 실험을 실시할 수 있으며, 수차의 각 회전수 및 각 유량에 대하여 토오크 및 수차 입구와 출구 사이의 차압을 측정하였다. 입력 P 와 출력 P_0 는, $P = \rho g Q H$ 와 $P_0 = T \omega$ 에 의해 각각 계산할 수 있으며, 이러한 입력과 출력을 이용해 수차의 효율 $\eta = P_0/P$ 를 구할 수 있다. 수차의 성능곡선은 일반적으로 가로축의 회전수에 대해서 세로축에 효율, 출력 그리고 유량의 형태로 나타낸다. 터보기계인 수차의 경우 성능특성을 나타내기 위해서 상사법칙으로부터 유도한 단위속도 및 단위출력을 자주 사용한다⁽⁷⁾. 단위속도 및 단위출력은 다음과 같이 나타낸다.

$$Nu = nD/H^{1/2} \quad (1)$$

$$P_u = P_0/(D^2 H^{3/2}) \quad (\text{종래형 충동형 수차}) \quad (2)$$

$$P_u = P_0/(DBH^{1/2}) \quad (\text{신형 용적형 수차}) \quad (3)$$

신형 용적형 수차와 종래형 수차의 성능특성을 비교하기 위해서 종래형 수차에 대해서는 자동세면기용 수도꼭지에 장착하여 사용하기 위해서 개발되어 최근 수년간 사용되고 있는 소형 터고식(Turgo type) 충동형 수차를 실험에 채용하였다. 이 수차는 2개의 노즐이 있으며, 그 노즐의 단면적은 각각 3.14 mm²이다. 외주에 14개의 버켓(물통)이 설치되어 있는 회전부의 직경은 22 mm이며, 신형 용적형 수차의 직경과 거의 동일하다. 종래형 충동수차와 신형 용적형 수차에 대해서 일정유량의 동일한 유량조건에서 실험을 실시하였다.

한편, 수차가 설계점에서 운전하는 것과는 달리, 실제의 운전조건은 설계점으로부터 떨어진 조건에서도 자주 운전하게 된다. 따라서, 다양한 운전 조건하에서 수차의 성능을 조사하는 것도 매우 중요하다. 종래형 충동형 수차에 대한 실험에서는 7 l/min까지의 일정한 유량 및 25 m까지의 일정한 낙차에서 실시하였다. 신형 용적형수차에 대한 실험에서는 최대 낙차 및 유량을 각각 70 m와 14 l/min까지의 범위에서 실시하였다. 종래형 충동형 수차와 신형 용적형 수차의 회전수는 각각 0-10000 min⁻¹으로 0-2800 min⁻¹의 범위에서 실험을 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 용적형 수차와 충동형 수차의 성능

Fig. 5와 Fig. 6은 신형 용적형 수차와 종래형 충동형 수차의 성능특성의 비교를 보이고 있다. 동일한 운전조건하에서 신형 용적형 수차는 종래형 충동형 수차에 비해서 고효율 및 고출력을 나타내고 있다. 종래형 수차가 유량 4-5 l/min, 낙차 8-12 m의 범위에서 운전될 때, 최고효율이 25 %이고 비속도는 9.5이다. 이러한 결과와 비교해서 신형 수차의 경우 동일한 실험 범위에서 최고효율이 약 62 %, 비속도가 약 3이다. 종래형 수차가 이와 같이 낮은 효율을 나타내는 이유로서 먼저 터빈 자

체의 크기가 작은 것이 그 원인이다. 일반적으로 큰 충동형 수차의 효율은 대략 90 %이지만^[4], 크기가 작아질수록 효율이 큰 폭으로 낮아진다. 그리고, 통상의 충동형 수차와는 달리 본 연구에 사용된 소형 충동형 수차는 회전부가 완전히 수중에 잠기는 상태로 회전하기 때문에 효율이 현저하게 저하하게 된다.

또한, 신형 용적형 수차의 효율은 보다 높은 유량으로 운전될 때 한층 더 증가한다. 신형 용적형 수차와 종래형 충동형 수차의 최고효율은 단위속도의 범위가 동일하지 않는데, 이것은 동일한 유량에서 종래형 충동형 수차의 회전수가 신형 용적형 수차보다 6배 정도 높은 것이 주된 원인이다. 또한, 용적형 수차의 유량이 수도꼭지로부터 나오는 평균유량의 2배인 12 l/min로 운전할 때 최고효율을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있으며, 종래형 충동형 수차에 비하여 신형 용적형 수차의 최고효율이 약 2.9 배 높다는 것을 알 수 있다.

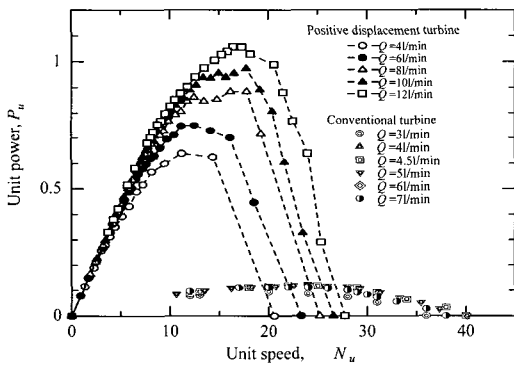


Fig. 5 Variation of unit power with unit speed

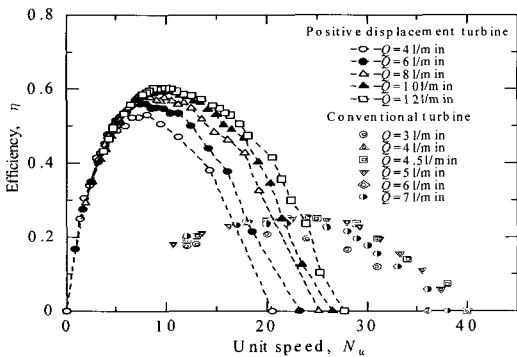
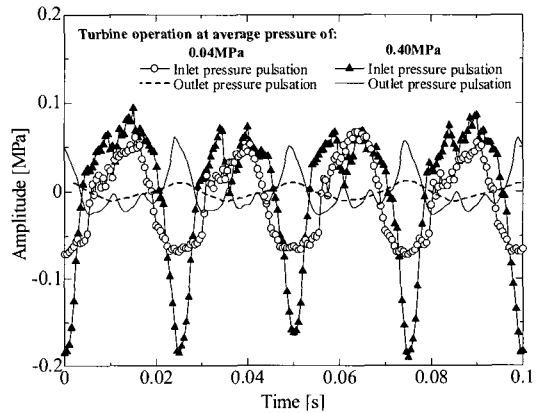


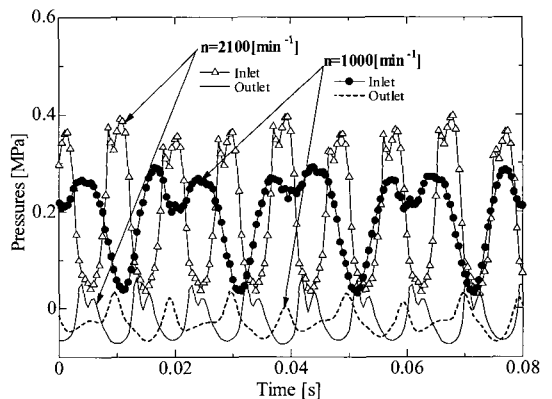
Fig. 6 Efficiencies of positive displacement turbine and conventional turbine at different flow rate

4.2 압력맥동의 억제

용적형 유체기계의 특성 중에서 성능에 큰 영향을 미치는 것이 압력맥동이다. 본 연구를 통하여 개발한 신형 용적형 수차에서도 입구에서 출구까지 흘러나가는 유체의 단속적인 흐름이 압력맥동을 발생시키는 것을 확인하였다. 이러한 압력맥동에는 2가지의 중요한 특징인 주파수와 진폭이 존재한다. Fig. 7은 수차의 입구와 출구로부터 각각 60 mm 떨어진 위치에서 계측한 압력맥동의 주파수와 진폭의 비교를 나타내고 있다. 또한, 수차의 상류 및 하류로부터 각각 200 mm 떨어진 위치에서도 압력맥동을 측정하여 Fig. 7에서 나타내고 있는 값과 거의 차이가 없는 것을 확인하였다.



(a) Constant speed, $n=800 \text{ min}^{-1}$



(b) Constant pressure (head), $p=0.2 \text{ MPa}$

Fig. 7 Pressure pulsations

Fig. 7(a)에서는 수차의 회전수가 같고, 유효낙차가 다른 경우의 운전조건에서 압력맥동의 진폭을 나타내고 있다. 또한, Fig. 7(b)는 수차의 유효낙차가 같고 회전수가 다른 경우의 압력맥동의 진폭을 보이고 있다. 압력맥동의 주파수는, $f=n(LON)/30$ 로 계산할 수 있다. Fig. 7(a)로부터 알 수 있듯이 보다 높은 유효낙차로 수차가 운전되는 경우, 수차의 입구와 출구에서 압력맥동의 크기는 증가한다. Fig. 7(b)에 의해 압력맥동의 크기는 수차의 회전수가 더욱 높아지는 경우에도 증가하는 것이 분명하다.

이러한 맥동은 관로계 또는 수력발전시스템에 때때로 매우 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서, 압력맥동을 제거하거나 또는 최소로 하기 위해서는 압력탱크 등의 댐퍼를 적절하게 사용하거나 로터의 형상을 수정하는 방법이 적용되고 있으며⁽⁹⁾, 본 연구에서는 직경 20mm, 높이 40mm의 작은 탱크를 이용하여 압력댐퍼를 적용하였다. 압력댐퍼 내부는 공기로 채워졌으며, 작동유체와 압력댐퍼내의 공기가 접촉하는 것을 방지하기 위해서 고무시트를 차단막으로서 사용하였다. Fig. 8은 압력댐퍼의 채용 유무에 의한 수차에서 발생하는 압력맥동의 비교를 나타내고 있다. 수차의 입구 부근에만 1개의 압력댐퍼를 설치했을 경우 입구 압력은 거의 안정되지만, 출구의 압력 맥동은 증가한다. 따라서, 차압맥동의 1/2정도만 줄일 수가 있다. 한편, 수차의 입구와 출구에 2개의 압력댐퍼를 설치할 경우 압력맥동의 3/4이상이 제거되며, 결과적으로 진동과 소음이 감소함에 따라 안정적인 운전을 할 수 있다.

5. 결 론

상수도 관로의 말단에 설치하여 높은 효율로 발전할 수 있는 신형 마이크로 용적형 수차의 개발에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 종래형 충동형 수차에 비하여 신형 용적형 수차의 최고효율은 약 2.9배 증가하였다. 또한, 신형 용적형 수차의 효율은 보다 높은 유량으로 운전될 때 한층 더 증가한다.

2. 간단한 압력탱크를 채용함에 의해 신형 용적형 수차의 압력맥동을 약 80 %까지 제거할 수 있으며, 안정적인 운전을 할 수 있음을 확인하였다.

3. 본 연구에 의해 개발된 신형 용적형 수차는 종래형 충동형 수차 보다 더 낮은 비속도 영역에서 마이크로 수력발전에 적합하다는 것이 판명되었다.

참고문헌

- [1] European Renewable Energy Exchange, Small hydropower Fact Sheet. <http://www.eurorex.com>
- [2] S. Davis, Microhydro : Clean Power from Water, New Society Publishers, Canada, 2003.
- [3] Water Recycle Group, Electricity from water with PowerPal, Micro and Mini Hydroelectric Generators., Canberra, Australia, 2000.
- [4] J. Thake, The Micro-Hydro Pelton Turbine Manual, ITDG Publishing, London, 2000.
- [5] A. Harvey, A. Brown, P. Hettiarachi and A. Inversin, Micro-Hydro Design Manual, ITDG Publishing, 2005.
- [6] P. Stephen, Fluid Mechanics for Engineerings, London, Butter Worths, 1964.
- [7] P. K. Nag, Power Plant Engineering, McGrawHill, Singapore, 2002.
- [8] H. E. Merritt, Hydraulic Control System, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967
- [9] I. J. Karassik, J. P. Messina, P. Cooper and C. C. Heald, Pump Handbook, McGraw-Hill, New York, 2001.

저 자 소 개



최영도 (崔永都)

1970년 6월생, 1996년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 2003년 요코하마국립대학 대학원 박사과정수료(공학박사), 1996년~1998년 대우중공업(주) 항공사업본부 사원, 2003년~현재 요코하마국립대학 대학원 공학연구원 조수



이영호 (李英浩)

1958년 2월생, 1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1986~1989년 일본동경대학 기계공학과(공학박사), 1980~현재, 한국해양대학교근무(기계정보공학부 교수), 2001. 12~2003. 6, (재)한국조선기자재연구원 원장(초대), 관심분야: PIV, CFD, 해양에너지, 유체기계