

산업용 밸브의 유량제어 시스템 설계

최정주
동아대학교 기계공학과

Flow Rate Control System Design for the Industrial Valve

Jeongju Choi
Department of Mechanical Engineering, Dong-a University

요약 본 논문은 산업용 밸브의 유량제어시스템을 제안하였다. 산업용 밸브는 주로 배관시스템에 장착되어 유량 및 압력 제어에 사용된다. 제어밸브의 구조 및 작동 방식은 설치환경과 작업용도에 따라 상이하다. 밸브는 그 형태에 따라 그루브 밸브, 버터플라이 밸브 및 볼 밸브 등으로 분류되고, 구동방식은 모터를 이용하거나, 유압 및 공압을 이용하는 것이 일반적이다. 제어밸브를 이용한 유량제어시스템은 유량을 계측하여 피드백시스템을 구현하여야 하지만, 본 논문에서는 고가의 유량센서를 사용하지 않고 밸브의 개폐에 따른 유량변화를 실험하여 밸브 전후단의 압력차와 개폐정도를 이용하는 방법을 제안하였다. 밸브의 유량은 유량계수를 이용하여 밸브 전후단의 압력차와 밸브의 개폐정도로 표현할 수 있으므로 이를 이용하여 유량제어시스템을 설계하였다. 제어입력에 따른 밸브의 개폐를 나타내는 전달함수는 신호압축법을 이용하여 구하였으며, 이를 이용하여 밸브 스템의 명령추종성능을 향상시킬 수 있는 외란관측기를 설계하였다. 제안된 제어시스템의 성능을 검증하기 위해 제어밸브 전후단에 압력센서를 장착하여 제안된 제어방법의 성능이 유량센서를 이용한 경우에 준함을 확인하였다.

Abstract This paper proposes a flow-rate control system for industrial valves. Industrial valves are used in piping systems to control the flow rate and pressure. In general, valves used in pipelines are classified into globe valves, butterfly valves, and ball valves according to the shape. Motor, hydraulic, and pneumatic systems are used for operating valves. The flow meter should measure the flow rate when configuring the flow-rate control system. On the other hand, because the flow rate of the valve can be expressed by flow coefficient, a control scheme is proposed using the pressure deviation, which measures at the front and rear of the valve. The transfer function for the valve, according to the control input, was estimated using the signal compression method. Based on the induced transfer function, the disturbance observer was designed to improve the command following the performance of the valve stem. The performance of the proposed control method is compared with the flow-rate control result using the flow meter used.

Keywords : Control Valve, Globe Valve, Signal Compression Method, Disturbance Observer, Flow rate Control

1. 서론

선박 및 플랜트 시스템에는 다양한 형태의 산업용 밸

브들이 사용된다. 밸브의 주요 목적은 배관을 흐르는 유체의 방향, 유량 및 압력들을 제어하기 위해 사용된다. 이러한 밸브의 성능 향상을 위해 산업용 밸브와 관련한 연

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음

*Corresponding Author : Jeongju Choi(Dong-A Univ.)

email: jchoi72@dau.ac.kr

Received August 21, 2019

Accepted January 3, 2020

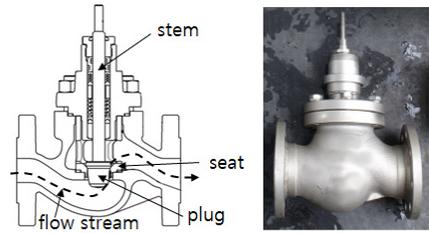
Revised October 23, 2019

Published January 31, 2020

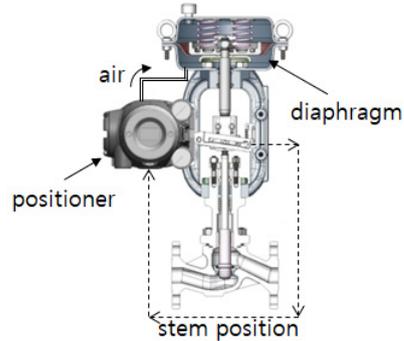
구는 밸브내부의 유동흐름과 유체 특성에 따른 캐비테이션 발생과 관련한 연구가 다수 있으며[1,2], 구동장치와 관련해서는 모터구동방식에 대한 연구들이 진행되었다 [3,4]. 또한, 고압의 유체 압력을 낮추거나 정압력으로 유지하는 감압밸브의 유량 및 토출압력에 대한 연구가 있다[5,6]. 산업용 밸브의 유량제어는 밸브 내부의 유량을 플러그와 시트사이의 간격을 조절하여 이루어진다. 그러나 밸브의 개폐와 밸브를 통과하는 유량사이의 관계식을 수학적으로 모델링 하기는 많은 비선형성과 불확실성으로 어렵다. 이에 밸브의 유량을 실험적으로 구하여 밸브의 개폐에 따른 유량 변화를 유량계수로 활용한다[7,8]. 기존의 밸브와 관련한 연구는 밸브 내부부를 흐르는 유체의 유동특성에 관해 CFD 및 유동가시화실험, 밸브 구동장치에 대한 제어성능 향상 등에 대해 주로 이루어졌지만, 산업용 밸브의 유량제어시스템 설계와 관련한 연구는 활발히 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 배관라인에 설치하는 그루브 타입 제어밸브의 유량 제어시스템 설계 방법을 제안하였다. 제안된 유량제어 시스템은 고가의 유량센서를 사용하지 않고 밸브의 개폐에 따른 유량 변화를 실험하여 밸브 전후단의 압력차와 개폐정도를 이용할 수 있는 방안을 제안하였다. 이를 위해 밸브 개폐량과 압력차 변화에 따른 유량 변화를 실험을 통해 그 상관관계를 확인하였다. 또한 밸브의 개폐에 대한 제어시스템 설계를 위해 스템의 거동을 나타내는 전달함수는 신호압축법을 이용하여 모델링하였다. 이를 통해 추정된 모델식은 제어시스템의 외란제거 성능 향상을 위한 외란 관측기[9] 설계를 위해 이용하여 밸브 스템의 위치 추종 성능을 향상시킬 수 있도록 하였다. 제안된 제어시스템의 성능은 유량계를 사용한 경우와 압력 센서만을 이용한 경우를 비교하여 그 성능을 실험적으로 검증하였다.

2. 제어밸브의 구동시스템

그루브 타입의 제어밸브는 Fig. 1(a)와 같이 밸브 내부의 유로를 시트와 플러그를 조절하여 유량을 제어한다. 시트와 플러그의 개폐는 스템의 상하 운동으로 조절되며 스템의 상하운동은 밸브 상단의 다이어프램에 압축공기를 주입하여 작동시킨다. 밸브의 개폐량은 스템에 연결된 포지셔너에 의해 계속된다. 이러한 제어밸브의 구조는 Fig. 1(b)에 나타내었다. 제어밸브의 유량제어를 위해서는 스템의 위치제어정밀도를 향상시켜야 한다.



(a) Structure of control valve



(b) Mechanism of control system

Fig. 1. Structure and schematics for control valve system

이를 위해 본 연구에서는 다이어프램에 의한 스템의 위치변화를 질량-댐퍼 시스템으로 간주하고, 제어입력에 대한 스템의 위치를 나타내는 동역학식은 2차시스템으로 고려하였다. 근사화된 2차 시스템의 파라미터는 신호압축법을 이용하여 추정하였다.

신호압축법의 원리는 임펄스응답의 라플라스 변환이 전달함수임을 이용한다. 임펄스 신호는 물리적으로 구현이 불가능하므로 임펄스 신호의 스펙트럼을 관심주파수 영역에서 균일한 크기를 가지는 스펙트럼 신호를 이용하여 전달함수를 구하는 방법이다. 스펙트럼 신호와 신장필터는 다음의 식을 이용하였다[10].

$$P(n) = \begin{cases} 60\exp\left[-\left(\frac{n}{a}\right)^{12}\right] & 0 \leq n \leq N/2-1 \\ 0 & n = N/2 \\ P(N-n) & N/2+1 \leq n \leq N-1 \end{cases} \quad (1)$$

$$H(jn) = \exp\left[-\left(\frac{12n^2}{b}\right)j\right] \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 파라미터 a는 측정에 필요한 주파수 영역까지의 파워 스펙트럼으로 설정하고, b는 입력신호의 시간 지연의 길이로 조절한다. 주파수역에서 위상 지

연에 의한 입력신호를 시간역으로 변환하면 입력신호를 생성할 수 있다. 식 (1), (2)를 이용하여 Fig. 2와 같은 시험 신호를 생성할 수 있다. 생성된 시험신호는 밸브의 개폐를 0~100% 개방하도록 하는 명령신호로 적용하였다. Fig. 3은 시험 신호에 대해 비례제어를 수행하기 위한 블록선도이다. 이때 전달 함수는 식 (3)과 같이 나타내어진다.

$$G(s) = \frac{K_p}{Js^2 + Bs + K_p} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (3)$$

$$J = \frac{K_p}{w_n^2}, \quad B = 2\zeta w_n J \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{1600}{s^2 + 76s} \quad (5)$$

여기서 J 는 등가관성모멘트, B 는 등가점성마찰계수 그리고 K_p 는 비례제어계인이다.

Fig. 4는 생성된 명령신호에 대한 비례제어를 수행한 실험 결과이다. 실험의 결과 데이터를 푸리에변환하여 신장필터를 통과시킴으로써 등가 임펄스 응답을 얻을 수 있다. 실험을 통해 얻은 등가 임펄스 응답과 단순 2차시스템의 감쇠비와 고유주파수를 변화 시켜 두 파워스펙트럼의 차단 주파수 영역이 일치하도록 하였다. Fig. 5는 실제 시스템과 모델링된 시스템의 등가 임펄스응답을 나타내는 파워스펙트럼과 위상선도이다. Fig. 5에서 고주파 영역에서 계인의 값이 커지는 것은 시험신호의 계인 특성이 임펄스와는 달리 차단주파수 이하에서 계인의 크기가 급격히 줄어들어 생긴 보상된 값으로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 두 선도를 일치시킴으로 식(4), (5) 같이 파라미터를 추정할 수 있다. 신호압축법을 이용하여 추정한 파라미터는 밸브 제어시스템의 외란 관측기 설계를 위한 공칭 모델로 활용하였다.

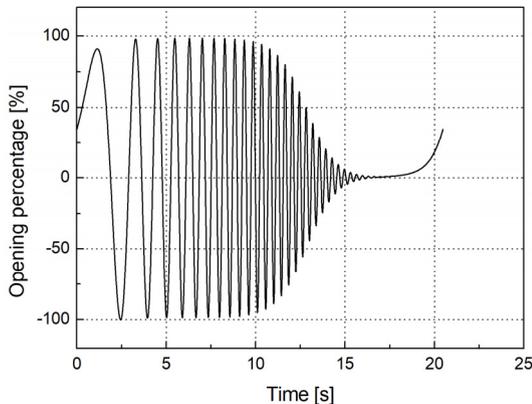


Fig. 2. Test signal for signal compression method

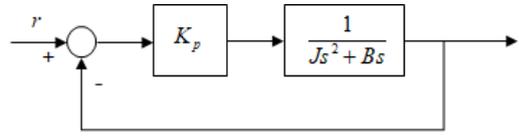


Fig. 3. Block diagram for the proportional control

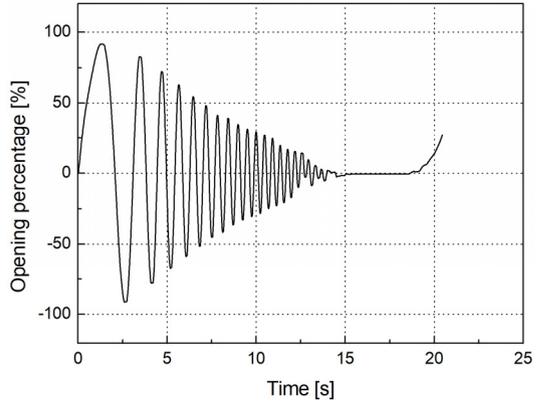


Fig. 4. Experimental result for test signal

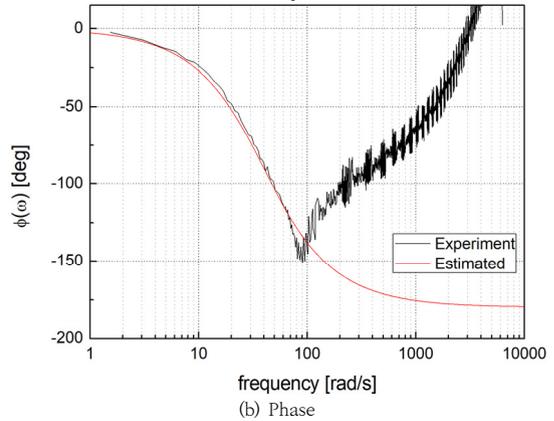
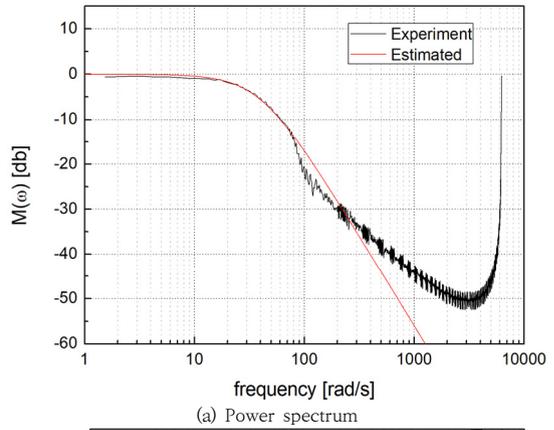


Fig. 5. Power spectrum and phase of the valve stem motion

3. 제어밸브의 구동시스템

그루브 밸브의 유량제어시스템을 설계하기 위해서는 밸브를 통과한 유량을 계측하여야 하지만, 본 논문에서는 고가의 유량계는 사용하지 않고 압력계를 이용하여 제어하는 방법을 제안하였다. 제어밸브는 밸브의 개폐정도에 따라 밸브를 통과하는 유량을 유량계수로 나타낼 수 있고 이는 밸브 전후의 압력차에 비례한다[7,8]. 이는 IEC 534-1, IEC 534-2-3 규정에서 다음과 같이 나타낸다.

$$Q = N \cdot C_v \sqrt{\frac{\Delta p}{G}} \quad (6)$$

여기서 N 는 상수, C_v 는 유량계수, G 중력계수, Δp 는 밸브 전후단의 압력차이다.

식 (6)에서 유량은 밸브 전후의 압력차에 비례관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 유량과 밸브 차압의 관계를 이용하여 Table 1과 같이 밸브 전후의 차압 및 밸브의 개폐량에 대한 실험계획을 수립하고 각 조건에 따른 유량을 계측하였다. 유량 변화를 측정하기 위해 내경이 65mm인 그루브 밸브 전후단에 압력계를 Fig. 6과 같이 설치하였다. 사용된 압력센서의 계측범위는 0~7kgf/cm²(분해능 0.01 kgf/cm²)이고 유량센서는 최대측정범위는 100m³/h(허용오차 ±2%)이다. 밸브의 개폐는 20% 간격으로 증가시켜 그 유량을 계측하였고, 밸브의 차압은 0.25kgf/cm²에서 1.5kgf/cm²까지 증가시켰다. 밸브의 차압을 유지하기 위해 밸브 배관에 장착된 펌프의 RPM을 조절하여 그 차압을 유지시켰다. 밸브의 개폐에 따른 유량 측정결과의 평균값을 이용하여 Fig. 7과 같이 밸브개폐에 따른 유량 그래프를 구하였다. 실험의 결과는 밸브 개폐량, 유량 및 압력차 사이의 상관관계를 나타낸다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 밸브 스템의 위치 제어에 기반 한 유량제어시스템을 제안하였다.

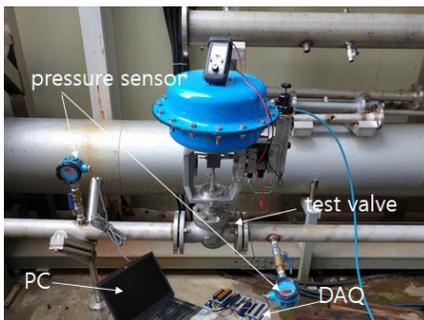


Fig. 6. Layout for the experiment

Table 1. Experimental conditions for flow rate

pressure deviation [kgf/cm ²]	valve opening [%]	flow rate [m ³ /h]
0.25	10	1.49
0.25	30	4.60
0.25	50	8.63
0.25	70	13.81
0.25	90	16.69
0.75	10	2.57
0.75	30	7.92
0.75	50	14.85
0.75	70	23.76
0.75	90	28.72
1	10	2.98
1	30	9.20
1	50	17.26
1	70	27.62
1	90	33.38
1.5	10	3.659
1.5	30	11.27
1.5	50	21.1
1.5	70	33.82
1.5	90	40.88

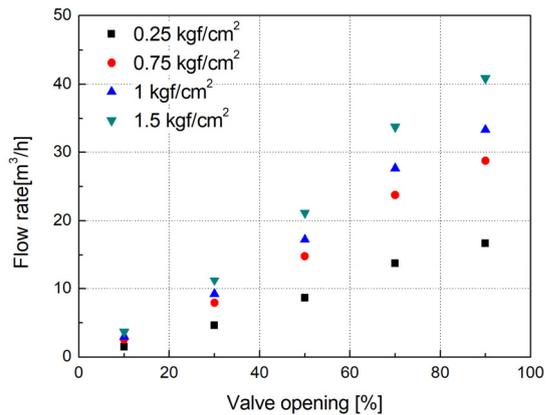


Fig. 7. Average flow rate according to valve opening

4. 유량제어시스템 설계 및 실험

신호압축법을 통해 선형시스템으로 간주된 밸브의 스템 거동 동역학식에 대해 비선형 외란을 상쇄시킬 수 있는 외란관측기를 설계하였다. 외란관측기 기반의 제어시스템의 블록선도는 Fig. 8과 같다. 그림에서 $C(s)$ 는 공칭시스템에 대한 주 제어기, $Q(s)$ 는 저주파통과필터,

$P(s)$ 와 $P_n(s)$ 는 실제 시스템과 공칭시스템이다.

$Q(s)$ 필터는 식 (7)과 같이 40 rad/sec의 차단주파수를 가지는 3차 저주파 통과 필터로 설계하였다.

$$Q(s) = \frac{64000}{(s^2 + 20\sqrt{2})s + 1600}(s + 40) \quad (7)$$

밸브 스템의 위치제어를 위해 사용한 주제어기는 일반적으로 산업현장에서 널리 사용되는 PI제어기를 이용하였다.

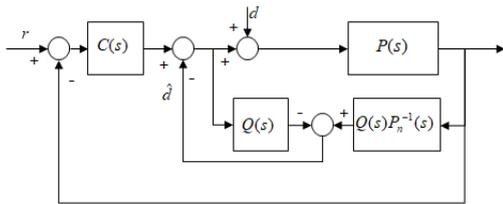


Fig. 8. Block diagram for disturbance observer

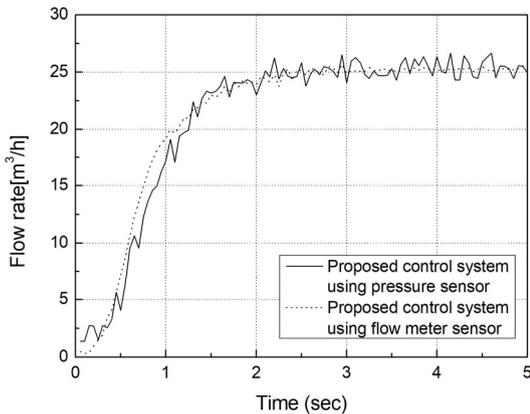


Fig. 9. Experimental result for the proposed control scheme

실험을 위해 설정 유량은 25m³/h로 하였다. 실험의 결과는 제안된 제어시스템에 압력센서를 이용한 경우와 유량센서를 이용한 경우를 Fig. 9와 같이 비교하였다. 유량센서를 이용한 경우 25m³/h의 설정 유량에 대해 정상상태오차가 0.08m³/h이고, 압력센서를 이용한 경우 0.18m³/h임을 확인하였다. 제안된 제어시스템은 고가의 유량센서를 사용하는 대신, 압력센서를 이용하여 그 성능이 유량센서를 사용한 경우에 준함을 알 수 있다. 이는 배관라인에 적용되는 산업용 밸브의 유량제어 시스템을 설계함에 있어 보다 저렴한 방법으로 시스템을 구성하는 방안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 논문에서는 압력계를 이용한 산업용 밸브의 유량제어시스템 설계 방법에 대하여 제안하였다. 제안된 제어 방법은 밸브의 유량을 제어하기 위해 고가의 유량계를 사용하는 대신 압력센서를 밸브 전후에 장착하여 밸브를 통과한 유량을 제어할 수 있도록 제안하였다. 제안된 제어시스템 설계를 위해 고려한 주요 사항은 아래와 같다.

1. 밸브의 개폐에 따른 스템의 동특성은 신호압축법을 이용하여 2차의 전달함수를 구하였다.
2. 신호압축법을 이용한 밸브 스템의 모델식은 밸브 개폐 제어시스템의 성능향상을 위해 외란관측기 설계를 위한 공칭모델로 활용하였다.
3. 밸브의 개폐, 밸브전후단의 압력차 및 이에 따른 유량변화에 대한 상관관계를 규명하였다.

제안된 제어시스템을 바탕으로 유량제어 실험을 수행하고 그 성능을 검증하였다. 성능 검증을 위해 제안된 제어시스템은 유량센서를 이용한 경우와 비교하였다. 25m³/h로 설정한 참조 유량에 대해 본 논문에서 제안한 제어 방법의 성능이 정상상태 응답에서 유량센서를 사용한 경우 대비 99.2%의 성능을 보임을 확인하였다. 제안된 제어시스템의 성능은 고가의 유량계를 사용한 경우 보다 우수하지는 않지만 저가의 압력계를 사용하여 유량센서를 이용한 경우에 준하는 성능을 보임을 실험을 통해 확인하였다.

References

- [1] A. M. Jazi and H. Rahimzadeh, "Waveform Analysis of Cavitation in Globe valve," *Ultrasonics*, Vol. 49, pp. 577~582, 2009. DOI: <http://www.doi.org/10.1016/j.ultras.2009.02.004>
- [2] B. Liu, J. Zhao and J. Qian, "Numerical analysis of cavitation erosion and particle erosion in butterfly valve," *Engineering Failure Analysis* Vol. 80, pp. 312-324, 2017. DOI: <http://www.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.045>
- [3] J. Jung and P. Seong, "Error analysis in improved motor control center method for stem thrust estimation of motor-operated valves in nuclear power plants," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, No. 3, pp. 735~740, 2003. DOI: <http://www.doi.org/10.1109/TNS.2003.812458>
- [4] S. Kang, S. Park, D. Lee, Y. Kim and D. Kim, "A study on the stem friction coefficient behavior of motor-operated valves," *Nuclear Engineering and*

- Design, Vol. 241, pp. 961~967, 2011.
DOI: <http://www.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.01.017>
- [5] J. U. Byeon, C. H. Kim, S. H. Park, M. W. Lee and M. C. Kang, "Effects of Flow Rate and Discharge Pressure with Compressing Spring in Non-diaphragm Type Stem of Water Pressure Reducing Valve," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 5, pp.103~109, 2019.
DOI: <http://www.doi.org/10.14775/ksmpe.2019.18.5.103>
- [6] J. S. Lee, "Design and Computational Fluid Dynamics of Pressure Reducing Valve," Journal of Korea Society Academia-Industrial Cooperation, Vol. 13. No. 7. pp. 2853-2857, 2012.
DOI: <http://www.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.7.2853>
- [7] C. W. Kang, C. S. Yi, S. M. Jang and C. W. Lee, "A Study of the Measurement of the Flow Coefficient Cv of a Ball Valve for Instrumentation," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Vol. 18, No. 3, pp. 103~108, 2019.
DOI: <http://www.doi.org/10.14775/ksmpe.2019.18.3.103>
- [8] C. Alimonti, "Experimental characterization of globe and gate valves in vertical gas-liquid flows," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 54, pp. 259~266, 2014.
DOI: <http://www.doi.org/10.1016/j.exphemflusci.2014.01.001>
- [9] L. Wanga, X. Liub and C. Wang, "Improved disturbance observer based control for airborne photoelectric stabilized platform," International Journal for Light and Electron Optics, Vol. 188, pp. 133~136, 2019.
DOI: <http://www.doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.05.041>
- [10] N. Aoshima, "Measurement of nonlinear vibration by signal compression method," Journal of the Acoustical Society of America, vol. 76, no. 3, pp. 794-801, 1984.
DOI: <http://www.doi.org/10.1121/1.391303>

최 정 주(Jeongju Choi)

[정회원]



- 2001년 8월 : 부산대학교 공과대학원 지능기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 부산대학교 공과대학원 지능기계공학과 (공학박사)
- 2008년 3월 ~ 2009년 2월 : University of Michigan 포스터 박사

• 2013년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 조교수

<관심분야>

지능형기계시스템, 제어시스템설계