

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.6.397>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

발전소의 스팀제어용 유압서보 액추에이터의 공기배출 밸브에 관한 연구

이 용 범** · 이 종 직*

* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

A Study on the Air Vent Valve of the Hydraulic Servo Actuator for Steam Control of Power Plants

Yong Bum Lee** and Jong Jik Lee*

* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received November 19, 2015 ; Revised March 4, 2016 ; Accepted March 10, 2016)

Key Words: Power Plants(발전소), Hydraulic Servo Actuator(유압서보 액추에이터), Hydraulic Fluid(유압 작동유), Air and Gas(기체), Modeling and Simulation(모델링 & 시뮬레이션)

초록: 원자력 발전소와 화력 발전소에서는 양질의 전기를 생산하기 위해서는 발전기에 연결된 고압 및 저압 증기터빈에 최적량의 증기를 공급하여야 한다. 터빈에 증기를 공급하거나 차단하는 특수한 밸브인 터빈출력제어장치를 사용하고 있으며, 이 터빈출력제어장치는 유압서보 액추에이터로 구동 된다. 발전소에서는 유압시스템에서 생성되는 기체로 인하여 유압서보 액추에이터의 성능이 저하되거나, 생성된 기체가 압축되면서 발생하는 열로서 씰을 태우고 마모를 증가시켜서 빈번한 고장이 유발된다. 일부 발전소에서는 고정형 오리피스를 사용하여 공기를 배출하고 있지만 많은 유량배출에 따른 동력 손실과 빈번하게 작동되는 펌프, 전기모터 및 밸브 등의 고장을 발생시킨다. 본 연구에서는 기존의 고정형 오리피스와 같이 초기에 많은 량의 공기를 배출하고 정상운전에서는 매우 미세한 유량만 통과 시킬 수 있는 부하 감응형 공기 배출밸브를 모델링하고 해석하여 장착함으로써 유압서보 액추에이터의 제어 정밀성 확보와 기체 압축으로 인한 고장을 방지할 수 있게 하였다.

Abstract: To produce adequate electricity in nuclear and thermal power plants, an optimal amount of steam should be supplied to a generator connected to high- and low-pressure steam turbines. A turbine output control device, which is a special steam valve employed to supply or interrupt the steam to the turbine, is operated using a hydraulic servo actuator. In power plants, the performance of servo actuators is degraded by the air generated from the hydraulic system, or causes frequent failures owing to an increase in the wear of the seal. This is due to the seal being burnt as generated heat using the produced compressed air. Some power plants have exhausted air using a fixed orifice, and thus they encounter power loss due to mass flow exhaust. Failures are generated in hydraulic pumps, electric motors, and valves, which are frequently operated. In this study, we perform modeling and analysis of the load-sensing air-exhaust valves, which can be passed through very fine flow under normal use conditions, and exhaust mass flow air at the beginning stage as with existing fixed orifices. Then, we propose a method to prevent failures due to the compressed air, and to ensure the control accuracy of hydraulic servo actuators.

- 기호설명 -

† Corresponding Author, lyb662@kimm.re.kr
© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

d_h : 유압 직경 [mm]
 k : 단열 지수 [공기, $k=1.4$]

- ΔP : 차압 [MPa]
- Q : 유량 [L/min]
- Re : 레이놀즈수
- A : 단면적 [m^2]
- C_q : 유량계수
- V : 공기 부피 [cm^3]
- P : 압력 [MPa]
- T : 온도 [K 혹은 $^{\circ}C$]

그리스문자

- ρ : 입구의 밀도 [kg/m^3]
- ν : 동점성 계수 [m^2/s]

하첨자

- 1 : 압축 전
- 2 : 압축 후

1. 서론

원자력발전소와 화력발전소에서는 터빈에 스팀을 공급하거나 차단하는 터빈출력제어장치(turbine power control device)를 사용하고 있으며, 이는 유압서보액추에이터(hydraulic servo actuator)로 구동된다. 따라서 터빈출력제어장치의 유압서보액추에이터는 발전소의 핵심기기로서 성능 확보와 장시간 고장이 없어야 한다.⁽¹⁾

본 연구에서는 발전소의 유압시스템에서 생성되는 기체(air & gas)로 인하여 유압액추에이터의 성능을 저하시키고 고장을 유발하여 발전이 정지되는 문제를 보완하기 위한 것으로서, 기존 고정형 오리피스스의 문제점 분석과 부하 감응형 공기 배출 밸브(air vent valve)를 설계하여 해석하였다.

2. 본론

2.1 발전소의 터빈출력제어장치

발전소에서는 Fig. 1과 같이 고온 고량의 증기를 고압 및 저압 증기터빈에 공급하는 밸브인 터빈출력제어장치를 다수 사용하고 있다. 이 터빈출력제어장치는 Fig. 2와 같이 유압서보액추에이터와 강철 스프링으로 구동된다. 단동형 유압서보액추에이터로 스팀 밸브를 열고, 스프링으로 스팀 밸브를 닫는데 이는 지진이나 발전소 전기계통의 이상으로 비상 정전이 발생했을 때 가열된 스팀이 터빈으로 공급 되는 것을 차단하기 위

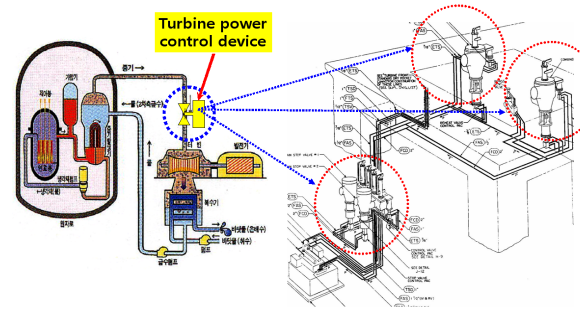


Fig. 1 Configuration of turbine power control device in nuclear power plant

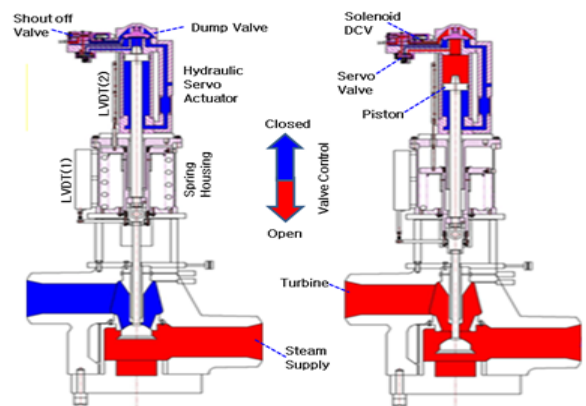


Fig. 2 Turbine power control device of power plant

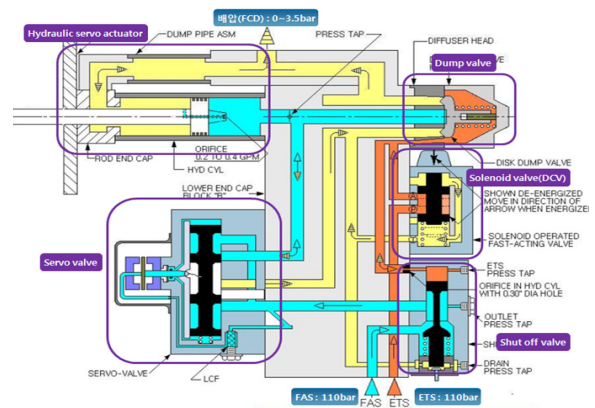


Fig. 3 Flow diagram of the turbine power control device

한 설계이다.⁽²⁾

유압서보액추에이터는 Fig. 3과 같이 변위 제어를 하는 서보밸브와 터빈속도에 따른 압력신호와 전기신호에 따른 급속 차단밸브인 기계식 차단 밸브(mechanical trip valve), 전기식 차단 밸브(electrical trip valve)가 부착되었으며, 비상시 액추에이터 내부에 존재하는 유압 작동유를 긴급하게 배출하는 디스크 덤프 밸브(disk dump valve) 등이 설치되어 있다.⁽³⁾ 유압서보액추에이터는 전기

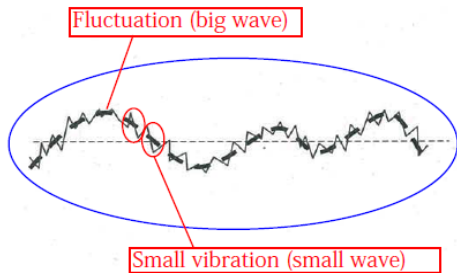


Fig. 4 Operation cycle of the hydraulic servo actuators of power plant

를 생산하기 위한 고압 및 저압 터빈에 최적량의 스팀을 공급하고, 고속(화력발전소 3600 r/min, 원자력발전소 1800 r/min)으로 회전하는 스팀 터빈이나 계통에 이상이 발생할 경우 터빈의 과속 방지를 위하여 스팀을 차단한다.⁽⁴⁾

2.2 터빈제어용 유압서보 액추에이터의 작동

발전소의 터빈은 최대출력상태(1000 MW)로 상시 운전되며, 원자력발전소의 유압서보 액추에이터 20개 중 16개는 행정거리의 100 %로 고정되고, 4개만 12 % 수준으로 유지시키면서 최대출력 발전을 위한 운전을 한다. 따라서 발전소의 유압서보 액추에이터는 3개월에 1회의 정기점검을 위한 전 행정거리 전진 및 후진 작동을 하고, 통상 발전중에는 액추에이터의 전진 및 후진을 거의 하지 않는다. 다만 고착 방지를 위해 Fig. 4와 같이 시간당 6회 전체 행정거리의 1%~2% 수준으로 변동(fluctuation)시키면서 시간당 180회 전체 행정거리의 0.5%를 진동(small vibration)시키는 제어를 한다.

2.3 터빈제어용 유압서보 액추에이터의 고장

터빈제어용 유압서보 액추에이터는 발전소의 최대출력제어 운전조건으로 액추에이터의 변위가 크지 않아서 액추에이터 내부의 유압유는 전량 배출이 일어나지 못하고 초기 가압상태를 지속적으로 유지되고 있다. 따라서 유압동력발생시스템(HPU)에서는 밸브와 오리피스 등의 누유 량과 미세변위 제어수준의 유압유를 공급하게 된다.

이때 발생하는 기체가 액추에이터의 내부에 잔류하여 압축성으로 제어 정밀성을 떨어뜨리고, 실린더와 피스톤 실(seal) 부분의 기체는 식 (1)과 같이 단열 압축으로 온도가 상승하여 윤활 저하를 가속시키며 이에 따른 마찰 과다로 기계효율 저하와 Fig. 5와 같이 마모고장을 발생시킨다.⁽⁵⁾

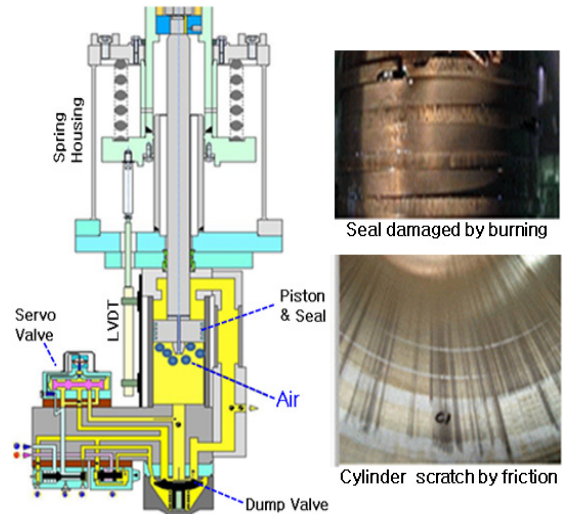


Fig. 5 Failure modes of the hydraulic servo actuator by the seal burning

$$T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \tag{1}$$

발전소에서 유압시스템의 유온은 50 °C로 관리하고 있으며, 비상정지를 고려한 급속 닫힘 시험(quick closing test)을 할 때 쿠션부분의 최고압력은 21 MPa까지 상승되어서 유압서보 액추에이터 내부의 기체는 약 500 °C 이상까지 높게 상승함으로써 실을 태워 손상시키고 마찰을 증가시킨다.

$$T_2 = (273 + 50) \left(\frac{21}{1} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} \\ \approx 771 (K) \approx 498^{\circ}C$$

발전소에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 유압서보 액추에이터의 고압부분에서 저압부분으로 고정형 오리피스를 설치하여 상시 일정량의 누유가 존재하도록 하여 기체를 배출시키고 있었다. 그러나 원자력발전소의 발전기 1기당 부착된 20개의 유압서보 액추에이터에서 많은 유량을 상시 누유시킴으로서 큰 동력 손실과 유압펌프를 빈번하게 on-off 작동시켜서 전기모터의 과열로 인한 고장과 공급 밸브의 막힘 고장 등이 추가적으로 발생한다.

2.4 기체 배출 장치의 분석

2.4.1 고정형 오리피스의 분석

원자력발전소 및 화력발전소에서는 약 1.5년 마

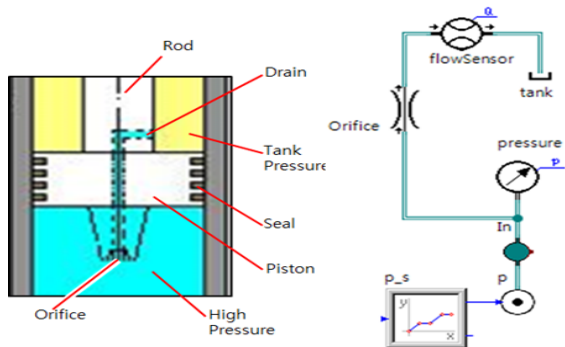


Fig. 6 Fixed displacement orifice and modeling result

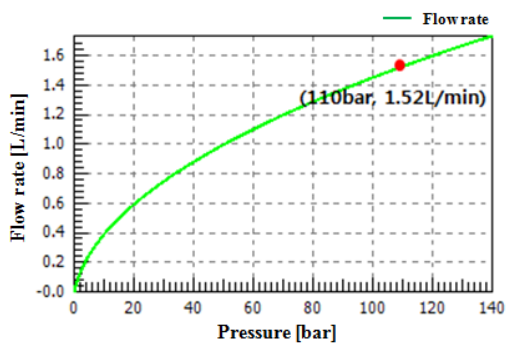


Fig. 7 The simulation result of fixed circle orifice

다 주기적으로 정비를 할 때 유압서보 액추에이터에 유입되어 잔존하는 기체와 발전을 위한 작동 중 발생하는 기체를 배출하기 위하여 일부 유압서보 액추에이터에서는 Fig. 6과 같이 오리피스 (0.6 mm)를 설치하여 상시누유를 허용하고 있다.

원자력발전소에서 11 MPa 수준으로 운전 하고 있는 것을 고려하여 Fig. 7과 같이 시뮬레이션 한 결과 1개의 오리피스에서는 약 1.52 L/min이 누유되며, 발전기 1기당 20개의 유압서보 액추에이터를 사용함으로써 최대 30.4 L/min의 누유가 되고, 화력발전소에서는 발전기 1기당 10개의 유압서보 액추에이터를 사용함으로써 15.2 L/min의 누유가 된다.

오리피스를 통한 유량 Q는 베르누이 방정식과 연속방정식에서 식 (2)와 같이 정리되며, 층류의 정도와 에너지손실에 대한 보정 유량계수(C_q)는 레이놀즈수와 유로의 형태 및 압력 측정위치 등의 함수로서 실험적으로 주어진다.

따라서 유량계수(C_q)는 오리피스 단면적의 형상을 고려한 계수로 식 (3)과 같이 레이놀즈수에 의해 정의할 수 있다. 레이놀즈수는 식 (4)에 의해 구할 수 있다.^(6,7)

본 연구에서는 유량계수가 레이놀즈수에 의해

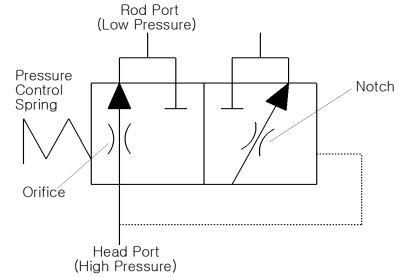


Fig. 8 Symbol of the air vent valve

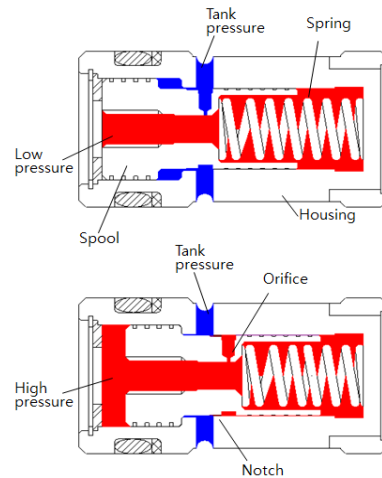


Fig. 9 Design of the air vent valve for turbine power control device

가변되는 값으로 원형 오리피스의 경우 수렴 시 최대 유량계수는 0.62로 하였으며, 최대 레이놀즈수는 200으로 설정하여 해석을 수행하였다.

$$Q = C_q A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \tag{2}$$

$$C_q = f(Re) \tag{3}$$

$$Re = \frac{Q d_h}{A \nu} \tag{4}$$

2.4.2 부하 감응형 공기배출 밸브 설계

부하 감응형 공기배출 밸브는 정비 후 발전 초기에는 많은 양의 공기를 제거하기 위해 기존의 오리피스 수준으로 많은 양의 누유를 허용하고, 발전 중에는 미소량의 누유만 통과할 수 있도록 공기배출 밸브를 Fig. 8의 기호와 같은 기능으로 설계를 하였다. Fig. 9와 같이 내면에 2단 형상 밸브 하우징과 오리피스와 노치가 형성된 2단형 스톱을 설치하여, 스톱의 노치가 오리피스와 하우징 유로를 연결하여 밸브가 닫혔을 때 미세 유량이 토출될 수 있도록 설계를 하였다.

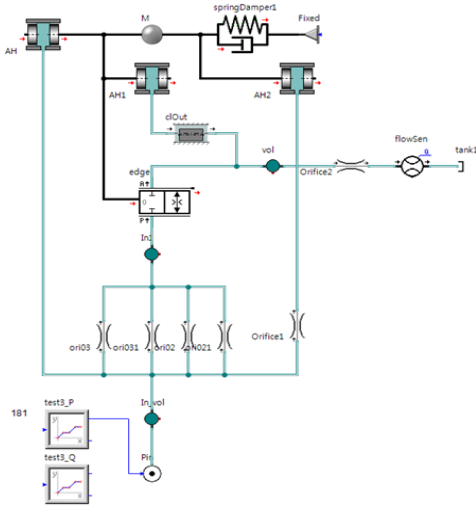


Fig. 10 Simulation model of air vent valve

밸브의 작동은 스프링 힘에 의하여 초기에 열린 상태에서 스톱의 양측 단면적 차에 압력을 곱한 힘과 밸브의 작동은 스프링 힘에 의하여 초기에 열린 상태에 스프링 힘에 의한 균형을 깨고 스톱이 스프링을 압축하면서 작동한다. 이는 설계 압력(1.2 MPa) 이하에서 오리피스 지름에 비례하여 많은 유량을 통과시켜 빠르게 공기를 배출하고, 설정 압력을 초과하면 통과 유량을 차단하고 밸브 스톱의 노치(notch)를 통하여 미소 유량만 배출함으로써 발전소 유압시스템의 유량 손실을 최소화 한다.

공기배출 밸브의 설계 타당성 검증하고 성능을 예측하기 위하여 해석 모델링을 SimulationX S/W로 Fig. 10과 같이 하였다. 해석 모델은 Fig. 8에서 제안한 설계와 같이 압력을 받는 3개의 단면과 스톱의 질량, 밸브의 압력설정 값을 결정하는 스프링 특성과 댐핑 기능 및 밸브의 유량 특성을 결정하는 스톱과 하우징 사이의 틈새와 오리피스의 직경 및 노치 등의 파라미터를 변화가 가능하도록 모델화하고 시뮬레이션을 통해서 각각의 설계 변수에 대한 검토를 통해서 최적화 하였다.

모델의 최적화는 오리피스 수량을 1개로 했을 때와 4개로 했을 때의 유량특성을 분석 하였으며, 스톱과 하우징 사이의 틈새(ring gap)에서 편심에 따른 유량 특성과 댐핑기능 및 스프링 강성 변화에 의한 응답성분석 등으로 밸브설계의 최적화를 하였다.

Fig. 11은 공기배출 밸브 스톱에 형성된 노치의 언더랩(underlap) 양에 대한 밸브 설계도의 민감도 해석 결과로 공기배출 밸브 입구의 압력을 선형적으로 14

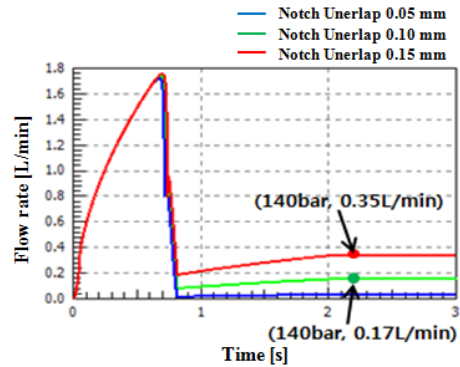


Fig. 11 Sensitivity analysis of spring initial force in air vent valve

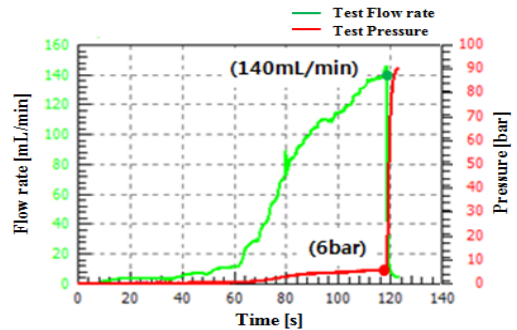


Fig. 12 Performance test result of the load sensing air vent valve

MPa까지 올리면서 밸브 메인 유로인 오리피스와 노치의 유량을 해석한 결과이다. 밸브의 스톱이 압력에 의해서 닫히면서 큰 유량(140 mL/min)을 차단하고, 노치에 의해 작은 유로가 열려 있어 적은 유량(0.35 mL/min)이 계속 흐르는 것을 알 수 있다.

노치 언더랩 양이 0.05 mm, 0.1 mm, 0.15 mm에 대한 해석 결과로 0.1 mm 설계 조건에서 밸브가 닫힌 후 메인 유량은 0.17 L/min, 0.15 mm에서는 0.35 L/min의 메인 유량이 흐르는 것을 알 수 있다. 따라서 해석 모델을 이용하여 공기배출 밸브가 닫히는 압력 조건 및 노치 설계에 활용 가능한 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 공기배출 밸브를 제작하여 시험한 결과로서 공기배출 밸브의 입구 압력을 서서히 상승시키면 압력에 따라 유량도 서서히 증가하는 것을 알 수 있다. 입구 압력이 0.6 MPa에서 밸브가 닫혀 유량은 차단되면서 시스템 사용 압력까지 급격히 상승하고 있다. 밸브가 닫히기 전 최대 유량은 140 mL/min으로 유압서보 액추에이터 내의 공기를 충분히 배출하다가 공기배출 밸브가 닫히는 압력 이상에서는 노치에 의한 미소 유량만 배출하기 때문에 유량 손실을 줄일 수 있다.

Fig. 13은 공기배출 밸브를 시뮬레이션 한 결과

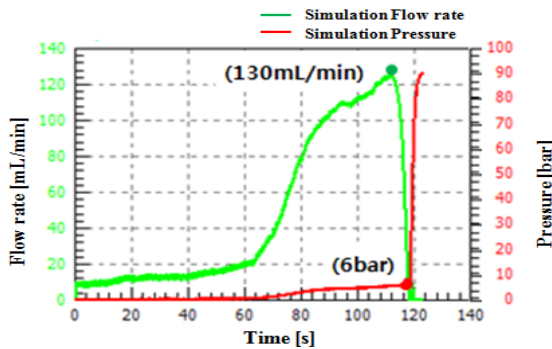


Fig. 13 Simulation result of the load sensing air vent valve

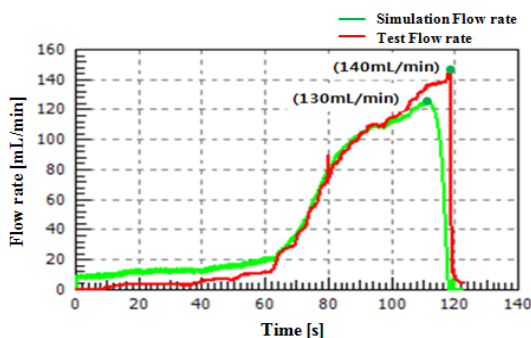


Fig. 14 Comparison of simulation with experiment for flow rate

로서 시험조건과 동일한 압력조건에서 해석한 결과로 0.6 MPa에서 밸브가 닫히고 밸브가 닫히기 전 최대 유량은 130 mL/min인 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 부하 감응형 공기배출 밸브의 메인 유로의 유량을 시험 결과와 해석 결과를 비교한 것으로 아주 유사한 결과를 얻을 수 있다. 정비 등에 의해 상당히 많은 양의 공기가 남아있을 때에는 많은 유량을 통가시켜서 빠르게 공기를 배출하고 통상 운전 중에는 밸브를 닫고 노치에 의해서 미소유량만 배출하여 운전중 통과유량을 크게 감소시키는 것을 시험 및 해석을 통해 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 발전소의 유압시스템에서 생성되는 기체로 인하여 유압서보 액추에이터의 성능을 저하시키고 고장을 유발하여 발전이 정지되는 문제를 보완하여 공기배출 성능은 향상하고 손실 유량은 줄이는 부하 감응형 공기배출 밸브를 제안하고 해석 및 시험을 통해 성능을 확인하였다.

(1) 발전소 유압시스템의 정비로 유입되는 많은 양의 공기를 운전 초기에 오리피스로 많은 양의 유량을 배출(140 mL/min)하고, 운전중 소량으로

유입되는 기체는 노치를 이용하여 미세 유량(0.08 mL/min)을 보낼 수 있도록 하였다.

(2) 밸브의 주요 인자를 변화 하면서 해석이 가능한 모델을 개발하여 공기배출 밸브의 성능을 예측함으로써 최적밸브를 설계할 수 있고, 실제 시스템에서의 시행착오에 의한 시간과 비용을 크게 절감할 수 있었다.

후기

이 연구는 "원자력/화력발전소용 공기 배출밸브 내장형 유압서보 액추에이터의 신뢰성 향상(과제 번호: MI4070)"의 연구비 일부지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌 (References)

- (1) Lee, Y. B. and Jung, D. S., 2010, "Secure Reliability of Turbine Power Control Actuator for Power Plants," *Journal of Drive and Control*, Vol. 7, No. 1, pp. 22~26.
- (2) Kim, H. J. and Kang, Y. H., 2002, "Service Life Analysis of Control Valve for Automatic Turbine Startup of Thermal Power Plant," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 26, No. 1, pp. 1~6.
- (3) Roh, J. H., Kim, S. H., Lee, D. I., Yang, C. K., Shin, Y. Y. and Jung, J. W., 2002, "The Development of Turbine Valve Actuator Efficiency Analysis System for the Standard Power Plants," *Trans. of the KIEE*, Vol. 25, No. 2, pp. 537~541.
- (4) Lee, Y. B. and Yoon, Y. H., 2013, "Modeling & Simulation of a Hydraulic Servo Actuator Cushion for Power Plants," *J. Korean Soc. Tribol Lubr. Eng.*, Vol. 29, No. 1, pp. 7~12.
- (5) Lee, Y. B., 2013, "Performance Characteristics Analysis of the Hydraulic System when Hydraulic Fluid Contains a Gas," *Proceedings of the KSME Annual Meeting (fall)*, pp. 770~772.
- (6) Jang, J. and Yoon, Y., 2007, "Analysis Model Developments of Hydraulic Power Steering System," *The Korean Society of Automotive Engineers, Spring Conference Proceedings*, Vol. 2, pp. 674~680.
- (7) SimulationX 3.6 User Manual and Library Manual, ITI GmbH, 2014.