발전소용 유압 서보액추에이터의 쿠션 모델링 및 시뮬레이션

이용범[†] · 윤영환^{*}

한국기계연구원 시스템신뢰성연구실

^{*}제이앤에프솔루션

Modeling & Simulation of a Hydraulic Servo Actuator Cushion for Power Plants

YongBum Lee[†] and Young Hwan Yoon^{*}

Department of System Reliability, Korea Institute of Machinery & Materials

^{*}J&F Solution

(Received October 2, 2012; Revised November 20, 2012; Accepted November 27, 2012)

Abstract – Turbine power control devices at a nuclear / thermoelectric power plant lead to failure by creating mechanical shocks and strong vibrations that are due to the strong elasticity of a spring and the inertia of the valve face during its rapid movement to block steam. To ensure durability of the turbine power control device, which is the main component in the power plant, it is necessary to develop a device that can prevent such vibrations. In this study, a cushion mechanism is added to the head of the hydraulic servo actuator, which is a turbine power control device. Moreover, the cushion mechanism, which includes various modifies shapes and orifices is investigated dynamically through modeling and simulations.

Keywords – turbine power control device(터빈출력 제어장치), cushion device(쿠션 장치), hydraulic servo actuator(유압서보액추에이터), simulationX(시뮬레이션 X)

1. 서 론

컴퓨터의 성능 발달로 인하여 시뮬레이션의 활용도가 높아지고 있고, 복잡한 시스템을 실제 시스템처럼 모사가 가능하여 CAE(computer aided enginee -ring) 기술 활용은 비용절감 및 개발 기간의 단축이라는 점에서 매우 중요하며, 최근 많은 제품개발과정에서 해석 기술로 활용되고 있다[1-4].

그 중 유압시스템은 제어가 용이하고 크기에 비해 강력한 힘을 전달할 수 있어 출력밀도가 높기 때문에 건설기계, 사출성형기 및 발전시스템 등에 널리 적용하고 있다. 국내의 경우 1970년대 초반, 밸브 및 펌프의 기

술 도입을 시작하였으나, 수요 시장의 협소 및 전문 기술 인력의 부족으로 해외 의존도가 높고 기술 자립이 취약한 편이다.

국내 기술개발 성과는 최근 괄목할 만한 기술성고를 이루고 있으나, 아직까지 유압시스템 개발은 각 부품을 개선 교환하여 시험하는 시행착오법(trial & error method) 방식으로 대상 및 실차 시험을 통해 문제점을 보완하여 개발함으로써 시간 및 비용이 크게 발생하고 있다. 특히 독자적인 시스템 개발 시 사양 선정 및 최적 설계에 어려움이 있다. 근래 제품 및 기술 수출 상담 시, 설계 기준에 대한 기준(back data)제시를 요구할 때 해석 기술의 부족과 설계 DB구축이 미비하여 많은 어려움이 있는 것으로 보고되고 있다.

본 논문에서는 원자력/화력 발전소에 사용 중인 터빈 출력제어장치(turbine power control device)가 동작될

[†]주저자 · 책임저자 : lyb662@kimm.re.kr

© 이 논문은 한국윤활학회 2012년도 추계 학술대회 (2012.10.17~19. 제주) 발표논문임.

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

때 큰 스프링 힘과 관성으로 발생하는 고체충격을 방지하기 위해서 터빈출력제어장치의 유압서보액추에이터(hydraulic servo actuator)의 후단 부에 쿠션 기능을 추가하고 쿠션설계 조건에 따른 동특성을 해석할 수 있는 모델링 및 시뮬레이션을 제안하였다.

2. 터빈 출력 제어 장치 모델링

2-1. 터빈 출력 제어 장치 구조 및 동작원리

Fig. 1에서와 같이 터빈출력제어장치는 대형 발전기(500~1000 MW)를 구동하여 양질의 전기를 생산하기 위해서는 발전기에 연결된 고압 및 저압터빈에 최적량의 스팀을 공급하여야하고, 고속(화력 3600 rpm, 원자력 1800 rpm)으로 회전하는 터빈이나 스팀계통에 이상이 발생할 경우 터빈의 과속(over speed) 방지를 위하여, 터빈으로 공급되는 스팀을 즉시 차단하여 터빈을 보호해야한다. 따라서 터빈의 속도제어와 계통의 스팀량을 감시하여 차단하는 발전소의 특수 밸브인 터빈출력제어장치는 아주 중요한 부품이다[5].

고속으로 회전하는 터빈은 스팀량에 의해서 전기품질이 결정되고, 스팀계통이나 터빈에 이상이 발생할 경우에는 터빈의 과속 방지를 위하여, 터빈으로 공급되는 스팀을 즉시 차단하고 외부로 배출시켜서 터빈을 보호해야 한다. 따라서 터빈의 속도와 계통의 스팀량을 감시하는 터빈출력제어기술과 신뢰성이 요구된다.

터빈출력제어구동장치는 Fig. 2와 같이 단동형(single acting type) 유압서보액추에이터(hydraulic servo valve & actuator)구조를 갖고 있지만 급속배출밸브(dump disc valve)와 급속유량차단밸브(shut off valve) 등으로 구성된 유압장치와 고 강성 스프링 장치에 의한 급속 귀환 장치가 조합된 복합 장치로 되어있다.

Fig. 2. Flow diagram of turbine power control device.

Fig. 3. Configuration of hydraulic system.

터빈출력제어장치는 유압서보제어 액추에이터에 의해서 작동되며, 상시 유압이 가압된 상태에서 작동되다가 비상시 대형 스프링과 급속배출밸브에 의해서 스팀을 차단하여 터빈의 과속을 방지하는 것으로서, 주 1회 정도 부정기적으로 작동된다.

2-2. 터빈출력제어장치 모델링 및 해석

일반적으로 유압시스템은 Fig. 3과 같이 에너지원인 유압 펌프, 제어 밸브, 액추에이터로 구성되어 있다. 모델 개발은 개발자의 위치에 따라 시스템 설계 목적 인지, 부품 개발용 인지에 따라 개발 방향이 결정된다. 시스템 설계자는 사용 부품의 내부 구조 설계 보다는 시스템 관점에서 사양을 정의하면 된다. 설계자 관점에서는 구매 사양 또는 카탈로그(catalog) 사양에 따라 모델을 개발하면 된다.

그러나 부품 설계자의 경우 주어진 조건에 맞게 부품을 설계하는 관점에서 해석모델을 개발해야 한다. 즉 설계 사양을 결정하기 위해 설계를 고려한 해석모델을 개발해야 한다. 해석모델의 신뢰성을 높이기 위해서는 유압 장치의 시험 데이터를 이용하여 해석모델에 활용

할 수 있다. 해석 목적에 맞게 시험 데이터가 있는 경우 해석모델에서 사용한 마찰력 등 추정 변수에 대한 연관성(correlation)이 있는 해석모델 검증 수행을 통해 신뢰성 있는 해석모델을 개발할 수 있다.

설계에 활용할 수 있는 일차원적 해석모델(1-D modeling)은 자연계에서 일어나는 물리적인 현상을 그대로 모델화 한다고 이해하면 된다. 즉 작동 원리(mechanism) 또는 시험하는 방법을 모델링하는 것이기 때문에 시스템의 작동 원리 및 시험 방법을 파악해야 한다.

기계 시스템의 일차원적 해석모델은 회전운동과 선형운동으로 구분할 수 있다. 선형 운동은 질량 선형 스프링 및 댐퍼(linear spring and damper)등 선형 운동에 관련된 요소이며, 회전 운동은 관성(inertia) 회전 스프링 및 댐퍼(rotary spring and damper)등 회전 운동에 관련된 요소이다.

유압 부품 및 시스템은 기본적으로 Fig. 4에서와 같이 어떤 움직이는 물체를 통한 유체의 흐름을 구하는 것이기 때문에 식 (1)의 운동방정식, 식 (2)의 연속 방정식, 식 (3)의 오리피스 방정식에 필요한 설계 변수(design parameter)는 운동방정식에 관련된 물리량, 연속 방정식에 관련된 물리량, 검사체적(control volume) 작동유 특성, 검사 체적 변화에 관련된 물리량, 오리피스 방정식에 관련된 물리량, 기타 솔레노이드 전류, 힘 특성 및 모터의 전류, 회전수, 토크 특성 등이 필요하다.

먼저 부품 및 시스템에 대한 기능 분석을 통해 각 기능 부품의 모델을 구성해야 한다. 구성된 부품의 모델을 이용하여 시스템에 대한 모델링이 필요하다. 모델링은 부하 조건 및 운전자 입력 조건 등 평가 방법이 포함되어 있어야 한다. 따라서 다양한 운전자 입력 조건 및 부하 조건에 대한 성능 평가 및 설계 변수 변경에 따른 민감도 해석 등 유압부품 및 시스템 개발에 활용할 수 있다.

$$\Sigma F = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\beta}{V} \Sigma Q \quad (2)$$

$$Q = C_d A_x \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3)$$

터빈 출력 제어 장치의 해석 모델은 Fig. 5와 같다. 서보 밸브 및 솔레노이드 밸브는 구매 사양으로 카탈로그 사양을 모델에 반영하였으며, 단 동형 유압서보

Fig. 4. Concept design of check valve.

Fig. 5. Simulation model of turbine power control device.

액추에이터와 급속배출밸브, 급속유량차단밸브는 제작 사양으로 도면의 설계치를 모델에 반영하였다.

본 연구의 해석에 사용된 SimulationX[6]는 독일의 ITI GmbH에서 개발한 시뮬레이션 프로그램으로 기계, 유공압, 전기, 제어 등 다양한 분야의 해석을 수행할 수 있는 프로그램으로서, 어떤 시스템을 구성하고 있는 부품들의 상호 작용을 해석하고 평가할 수 있는 대표적인 상용 Tool이다.

2.3. 터빈 출력 제어 장치 해석 결과

Fig. 6은 터빈 출력 제어 장치의 해석 결과이다. 급속 유량차단밸브, 서보 밸브의 작동에 따른 각 밸브

Fig. 6. Simulation results of turbine power control device.

Fig. 7. Simulation results of servo actuator.

및 유압서보액추에이터의 변위에 대한 해석 결과이다. 정상동작중에 급속유량차단밸브와 서보밸브가 4sec에서 off되면 급속배출밸브가 열리면서 서보 액추에이터는 닫히게 된다. Fig. 7은 서보 액추에이터의 변위와 가속도, 내부 압력에 대한 해석 결과로 정지부(end stop)에서 급격한 진동이 발행하는 것을 알 수 있다. 이것은 시스템에 손상을 주는 요인으로 개선설계가 반드시 필요한 것을 알 수 있다.

2-4. 서보 액추에이터의 유압 쿠션(cushion) 설계

Fig. 7의 해석 결과에서와 같이 유압 서보 액추에이터가 후진행정을 완료하는 끝단에서 부하 즉, 스프링 힘과 관성에 의해 큰 충격이 발생하는 것을 방지하기 위해 Fig. 8과 같이 유압 서보 액추에이터 피스톤에 쿠션 장치를 설계하였다. 부드러운 쿠션 역할을 위해 1, 2단 테이퍼(taper) 형상과 공차와 오리피스(damping orifice)의 조합에 의한 구조를 Table 1과 같이 설계하였다.

Fig. 9는 유압 서보 액추에이터의 쿠션 기구부의 위치별 동작원리를 나타낸다. (a)에서와 같이 서보 액추에이터의 후진행정을 완료하는 끝단에서 1차 테이퍼

Fig. 8. Concept design of cushion mechanism in servo actuator.

Table 1. Specification of cushion mechanism in servo actuator

Specification	Value	Note
Clearance	0.5 [mm]	
1st Taper part	$D_i : 49.4$ [mm]	
	$D_o : 54.4$ [mm]	
	$b : 24$ [mm]	
2nd Taper part	$D_i : 54.4$ [mm]	
	$D_o : 56.2$ [mm]	
	$b : 25.1$ [mm]	
Damping orifice	$\Phi : 2$ [mm]

Fig. 9. Flow diagram of cushion mechanism in servo actuator.

구간에서 1차 쿠션 기능을 하고 (b)의 2차 테이퍼 구간에서 2차 쿠션 기능을 하게 된다. (c)는 2차 테이퍼 구간이 끝나면 공차 부분에서는 하단의 댐핑 오리피스

Fig. 10. Simulation model of cushion device.

와 조합에 의해 3차 쿠션 기능을 하게 된다. 제한한 쿠션 기구는 서보 액추에이터의 진동 특성과 장착 공간, 제작 원가를 고려하여 최적의 쿠션 기구 설계가 필요하다.

2-5. 쿠션 기구 부 모델링 및 해석

Fig. 10은 유압 서보 액추에이터의 쿠션 기구부의 해석 모델로 Fig. 11과 같이 SimulationX에서 제공하는 라이브러리를 이용하여 랩 조건(lap condition)을 통해 1차 테이퍼, 2차 테이퍼 구간 및 공차 부분에

Fig. 12. Simulation results of flow area at taper edge.

Fig. 13. Comparison of simulation results with no cushion and cushion(dash) in hydraulic servo actuator.

대해 모델링이 가능하다. 모델의 타당성은 Fig. 12의 서보 액추에이터 변위에 대한 면적 해석 결과로서 확인이 가능하다.

해석 결과 설계 조건에 의해 2차 테이퍼에 의한 개도(flow area)가 계속 열린 상태에서 1차 테이퍼의 개도가 닫힌 후 2차 테이퍼의 개도가 닫히는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 동일한 조건에서 쿠션 유무에 대한 해석 결과를 비교한 것이다. (a)는 서보 액추에이터 변위에 대한 비교 결과로 쿠션이 있는 경우 닫히는 구간이 지연되면서 (b)의 가속도값이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 (c)의 급속배출밸브 변위와 (d)의 서보액추에이터 압력 변동도 쿠션장치가 있는 경우 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

원자력/화력 발전소에서 사용 중인 터빈출력제어장치의 동작시 발생하는 충격을 방지하기 위해 쿠션 장치의 설계에 활용할 수 있는 해석 모델을 개발하기 위해 각 부품에 대한 기능 및 특성 분석을 하였다.

터빈출력제어장치의 서보액추에이터의 쿠션 부의 설계 조건에 따른 동특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SimulationX를 이용하여 터빈출력제어장치 설계를 위해 구매부품의 경우 카탈로그 사양을 모델에 반영하였으며, 제작 사양의 경우 설계 도면을 모델에 반영하여 터빈출력제어장치 설계에 활용할 수 있는 동역학적인 해석 모델을 개발하였다.

2) 터빈출력제어장치의 내구성 확보를 위해 진동저감을 위한 쿠션기구를 제안하였으며, 다양한 쿠션 메커니즘을 해석 할 수 있는 해석 모델을 개발하였다.

3) 진동 저감을 위해 제안한 쿠션기구에 의해 우수한 진동 저감 효과를 해석적으로 확인하였다. 향후 해석 결과를 이용하여 실제 제품 제작 및 시험을 통해 해석 모델의 타당성 검증을 실시하여 향후 실제 적용을 위해 최적화 해석 및 설계 파라미터를 도출할 예정이다.

기호설명

A_x : 면적 [m^2]

Q : 유량 [L/min]

P : 압력 [MPa]

V : 검사체적 [cc]

β : 체적 탄성률 [MPa]

ρ : 밀도 [kg/m^3]

C_d : 유량계수

감사의 글

본 연구는 2012년도 KIMM 주요사업의 연구비(과제 번호 : NK-172C) 일부지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Joosup Jang and Younghwan Yoon, "Analysis model development for designing of hydraulic power steering system," *Transactions of the Korean Society for Automotive Engineers*, Vol. 16, No. 1, pp. 158-165, 2008.
2. Andreas Abel, Uwe Schreiber and Jens Schindler, "Engine and gear modeling and simulation for improving the shifting behavior of powertrains with manual or automated transmission," SAE, 06P-480, 2005.
3. Wang Chengbin and Quan Long, "Study on simulation and experiment of hydraulic excavator's work device based on simulationX," IEEE, 2011.
4. Joosup Jang and Younghwan Yoon, "Analysis model developments of hydraulic power steering system," *The Korean Society of Automotive Engineers*, Spring Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 674-680, 2007.
5. 이용범, "발전소용 유압서보액추에이터의 신뢰성 확보기술," *기계와 재료*, 2011.
6. SimulationX user manual and library manual, ITI GmbH, 2011.
7. K. S. Shin, J. P. Kim, C. H. Nam, S. G. Baek, O. K. Kwon, H. S. Ahn, I. S. Yoon, and D. G. Son, "Study on the development of condition monitoring technology for turbine lubricating systems in power plants," *Journal of the Korean Society of Tribologist and Lubrication Engineers*, pp. 51-58, 1994.