

# 발전소용 터빈출력제어 구동기의 신뢰성 확보 Secure Reliability of Turbine Power Control Actuator for Power Plants

이용범 · 정동수  
Y. B. Lee and D. S. Jung

## 1. 서론

원자력/화력 발전소에서 사용 중인 터빈출력제어 구동기(turbine power control actuator)는 유압 서보액추에이터(hydraulic servo actuator)로 구동하는 특수 스팀밸브(steam valve)로서 터빈의 속도를 제어하고 스팀을 차단하는 기능이 있다.

대형 발전기(500~1000 Mw)를 구동하여 양질의 전기를 생산하기 위해서는 발전기에 연결된 고압 및 저압터빈에 최적 량의 스팀을 공급하여야 하고, 고속으로 회전하는 터빈이나 스팀계통에 이상이 발생할 경우 터빈의 과속(over speed) 방지를 위하여, 즉시 터빈으로 공급되는 스팀을 차단하여 터빈을 보호해야 한다. 따라서 터빈의 속도제어와 계통의 스팀 량을 감시하여 차단하는 발전소의 특수 밸브인 터빈출력제어구동기의 신뢰성확보기술이 요구된다.

본 해설서에서는 전량 수입에 의존했던 원자력/화력 발전소용 터빈출력제어구동기의 국산화 개발과 신뢰성확보 기술에 대하여 논하였다.

## 2. 기술개발 배경

터빈출력제어구동기는 유압서보제어 액추에이터에 의해서 작동되며, 상시 유압이 가압된 상태에서 작동되다가 비상시 대형 스프링과 급속배출밸브(dump disc valve)에 의해서 스팀을 차단하여 터빈의 과속을 방지하는 것으로서, 주 1회 정도 부정기적으로 작동이 되며, 고열과 오염 입자 등으로 인하여 터빈출력제어구동기의 실린더 부분과 밸브가 고착되는 고장발생 사례가 있다. 특히 원자력발전소의 경우 핵연료교환주기(약 24개월) 때마다 터빈출력제어구동기들을 정비 또는 교체하고 있어 이때마다 시스템과 매칭(튜닝)기술이 요구되었다.

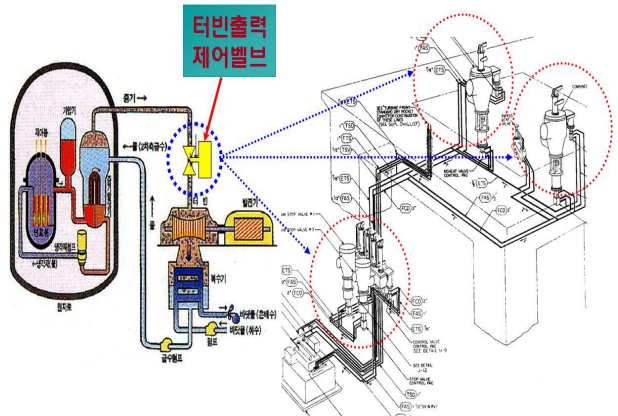


그림 1 원자력발전소 터빈출력제어구동장치 계통도

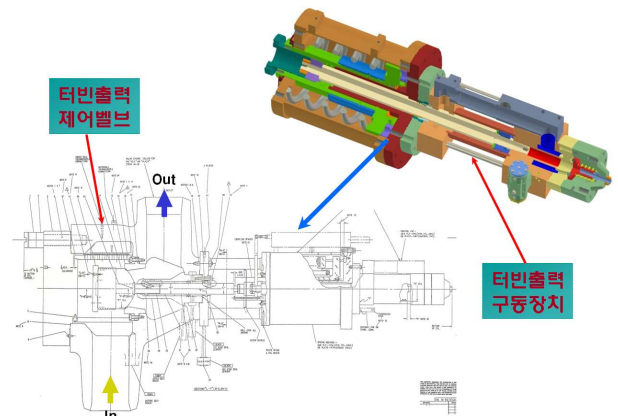


그림 2 터빈출력제어구동기

## 3. 터빈출력제어구동기의 개발

원자력/화력 발전소에서 사용되는 터빈출력제어 구동장치의 국산화 개발을 위하여 선진국(미국 GE사) 제품을 벤치마킹하였으며, 기하학적 특성분석을 위하여 치수, 형상공차, 조립공차, 표면 조도 측정, 도금 층 두께 측정을 하여 100% 호환(장착)이 가능하도록 하였고, 물리적 특성분석을 위하여 중요 부품 별 경도, 강도, 탄성, 열처리 종류 및 방법 파악과 경화 층 깊이를 측정하였다. 또한 화학적 특성분석을 위하여 재료의 화학성분 분석과 재료의 Code

를 파악하였다.

터빈출력제어구동장치는 그림 3과 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, Mechanical spring에 의한 급속 귀환 장치가 조합된 복합 장치로 되어있다. 유로와 작동 부품간의 간섭검토, 구조강도 등의 해석을 위해서 그림 4, 5와 같이 실 치수로 3D-Modeling을 하였고, 이 모델링을 통하여 액추에이터가 작동할 때 유로간섭과, 밸브작동에서 변위를 분석하였으며, FEM으로 구조강도 해석과 Diffuser 등 최적유로구조 설계를 하였다.

제품제작은 정밀가공을 기본으로 윤활과 실링을 위한 각 부분별 최적의 틈새, 내구성과 부식을 고려한 열처리, 도금 및 도장을 하였고 발전소 정비로 다년간 숙련된 전문가에 의해 조립을 하였다.

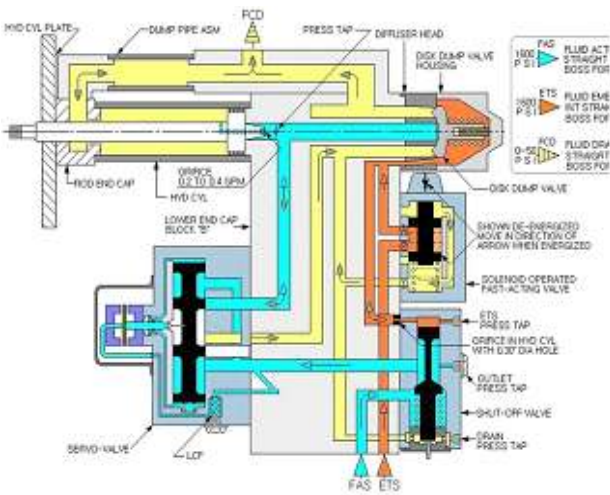


그림 3 유압계통 작동도

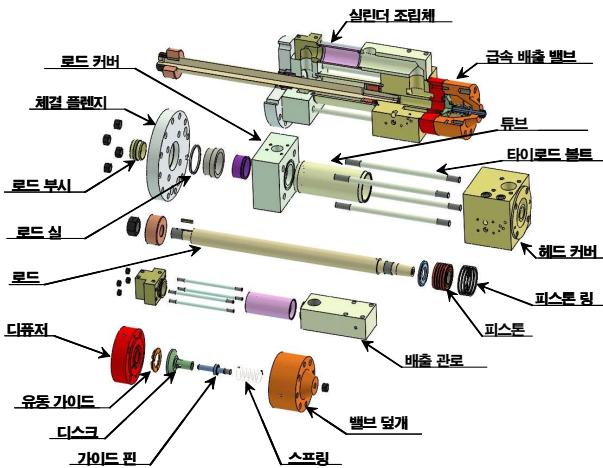


그림 4 출력제어구동장치 구조도

특히 기존에는 터빈출력제어구동장치를 정비 또는 신규제작 후 발전소 계통에서 튜닝을 했던 기존에 불합리한 점을 개선하기 위해 성능평가 시스템을 개발하여 최적으로 튜닝 함으로서 발전소 정비기간 단축은 물론, 높은 신뢰성을 확보 하였다.

### 3.1 제품설계

터빈출력제어구동기의 설계는 그림 5와 같이 모델링 FEM 해석 그리고 제작도면 순서로 진행 하였으며, Servo actuator, Dump disk valve, Shutoff valve, Spring housing 등에 대한 구조강도 (등가응력, 등가탄성 변형율, 전체 변형량)를 해석하였다. 해석 모델의 격자 형태는 비정렬 격자로 하였고, 격자 생성은 Tetra 격자 구조를 취하였다. 조립체 내에서 부품의 접촉 조건은 볼트에 의하여 고정되었거나, 부품 간의 구속 조건으로 인하여 고정되어 있다면, 면과 면이 접하는 부분은 결합된 것으로 가정하고, 재질은 탄소강과 실제사용 강재로 하였다.

구분	3D modeling	FEM 해석	2D 제작도
Servo Actuator			
Dump disk valve			
Shutoff valve			
Spring housing			

그림 5 3D modeling, FEM 해석 및 제작도설계

### 3.2 제품제작

개발품 제작은 현재 출력구동장치의 고장사례와 FMEA (failure mode & effects analysis)를 통한 다양한 문제점을 분석하고, Dump disk valve의 Diffuser rib & flow line, Actuator rod sealing, Piston head seal system, Dump guide pin 그리고 Tie Rod 및 Dump Housing 체결력 등에 대한 개선 방안을 설계에 반영하여 그림 6과 같이 제작하였다.



그림 6 원자력발전소 터빈출력 구동장치 조립

### 3.3 Test Code 개발

터빈 출력제어구동장치의 Test code를 개발하기 위하여, 원전/화력발전소 고장 사례를 통한 고장모드영향분석(failure mode & effects analysis)과 치명도 매트릭스분석(criticality matrix analysis)을 실시하고, 결함나무분석(fault tree analysis)과 2단계 품질기능전개(2-stage quality function deployment)를 통하여 고장형태에 따른 주요 시험항목을 결정하였다.

### 3.4 시험장치 구축

시험장치 구축은 원자력/화력발전소에서 터빈 출력제어구동장치가 구동되고 있는 상황을 재현 할 수 있도록 그림 7과 같이 블록다이어그램을 작성하고, 그림 8과 같이 각각의 기능과 성능을 검사할 수 있는 압력계, 유량계, LVDT, 전압계, 전류계, 온도 센서 및 카운터 등의 센서를 부착하고, 그림 9와 같이 발전소와 동일한 조건으로 장착이 가능한 Modular mounting type 고 강성 시험기, 동적/정적 시험이 가능하고 결과가 성적서로 출력되는 프로그램과 제어반을 개발하였다. 따라서 발전소에서는 이 시험결과를 근거로 교환즉시 운전이 가능하도록 신뢰도를 높였다.

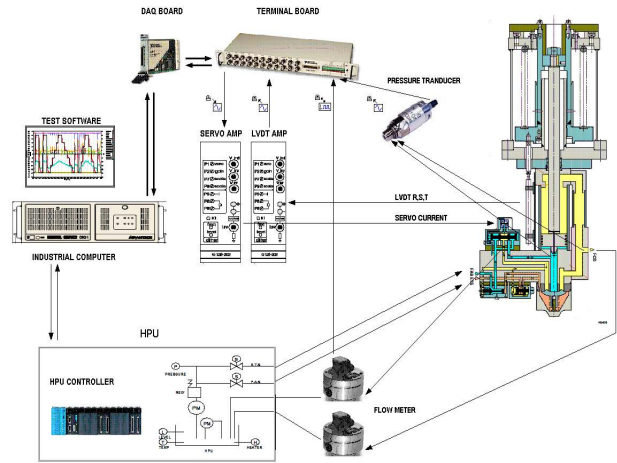


그림 7 시험장치 블록다이어그램



그림 8 시험장치 제어반 및 Test mechanism

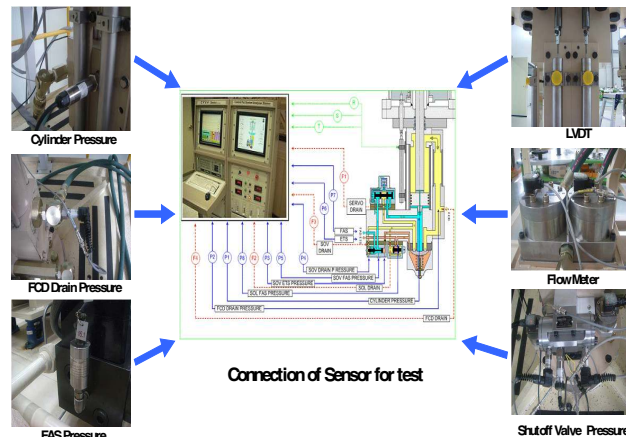


그림 9 센서연결 및 배치도

### 3.5 시험평가

시험평가는 아래와 같이 기본적인 외형치수, 액추에이터변위(stroke)검사와 인산에스테르계열 유압유를 이용한 청정도 유지(flushing), 고장안전성시험(fail safe test), 작동특성시험(trip characteristics test), 서보밸브 신뢰성시험(servo valve reliability

test), 액추에이터 성능시험, 작동시험, 급속작동솔레노이드 성능시험등 약 25항목의 중요부분에 대하여 시험결과를 성적서로 발행하여 이 시험데이터를 근거로 발전소에서는 추가 시험을 하지 않고 즉시 사용이 가능하도록 하였다.

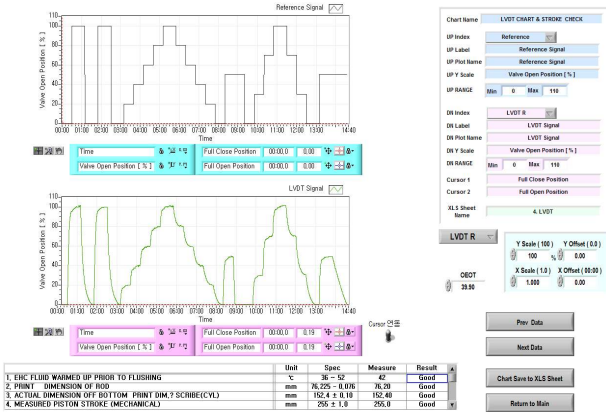


그림 10 시험 결과 출력

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 원자력/화력발전소의 전량 수입에 의존하고 있던 출력구동장치를 국산화 하였고, 종합성능평가 시험 장비를 구축하여, 시험평가(진단)를 실시하여 발전소시스템의 정비 신뢰도 향상으로 안정성을 증진하였다.

발전소 운영에서 발생하는 기술적 문제점을 제품 개발에 반영함으로써 기존의 수입품에 대하여 높은 수준의 출력구동장치가 개발되었고, 국산화 개발을 성공함으로써 발전소에서 발생하는 돌발적인 요구에도 즉시 대응이 가능하였다.

특히 기존에는 수입 예비품을 교체하고 원자로 또는 보일러를 가동하여, 발생된 증기를 이용하여 출력구동장치를 시스템과 매칭(튜닝)을 하였으나, 종합성능평가 시험시설이 구축됨으로서 중요항목에 대하여 시험결과를 성적서로 발행하여 이 시험데이터를 근거로 발전소에서는 추가 시험을 하지 않고 즉시 사용이 가능하도록 하여 신뢰도 향상과 시운전시간을 단축하였다.

따라서 발전소 출력구동장치 계통의 열화 평가와 관련기기의 수명연장 및 유지비용 절감은 물론 출력구동장치의 국산화로 2009년 기준 연간 약 100억 원의 수입대체효과와 발전소 특수기술을 관련 산업에 이전함으로써 기술적 파급효과가 기대된다.

표 1 터빈 출력구동장치 시험성적서

시험 및 검사 항목	단위	사양	결과
1. FAIL SAFE 전환	방향	Close	Closed
2. FAIL SAFE 차단시간	sec	42.0 ± 20	28.6
3. ACTUATOR HYSTERESIS	%	≤ 2.30	1.13
4. FASV INPUT 신호	VAC	110, 220	110
5. FASV ON-OFF 누유	LPM	≤ 1.0 ± 0.2	0.76
6. FASV NORMAL 누유	LPM	≤ 0.2 ± 0.1	0.02
7. SHUT-OFF 밸브 누유	LPM	≤ 0.1 ± 0.05	0.04
8. SHUT-OFF EMERGENCY TRIP 공급압력	kgf/cm <sup>2</sup>	≤ 112.5	102.82
9. SHUT-OFF 밸브 유체 공급압력	kgf/cm <sup>2</sup>	≤ 112.5	104.92
10. IN OUT PUT 전류	± mA	16/48	48
11. NULL BIAS 누유	LPM	≤ 6.72	4.27
12. 부시- 스톱 조립체 누유	LPM	≤ 2.30	0.25
13. NULL BIAS 전류	mA	≤ 3.40	2.12
14. ACTUATOR 출력	KN	38.80 ~ 201.11	111.39
15. ACTUATOR 작동성능	%	80.06 ± 1.5	80.05
16. TEST OPENING TIME	sec	45 ± 5.0	43.30
17. TEST CLOSING TIME	sec	45 ± 5.0	43.30
18. 유압차단 끝단 평균압력	kgf/cm <sup>2</sup>	≤ 3.52	2.90
19. 유압공급 끝단 평균압력	kgf/cm <sup>2</sup>	25.7 ± 6.4	24.70
20. 차압	kgf/cm <sup>2</sup>	18.7 ± 6.4	18.2
21. SOLENOID SHIFT TIME FOR TRIP TEST	sec	≤ 1.0	0.87
22. CYLINDER STROKE TIME FOR TRIP TEST	mm/sec	165.9 ± 1.5	
23. ACTUATOR CLOSED TIME AT EMERGENCY TRIP	sec	≤ 1.0	0.87
24. DASHPOT START POINT FOR TRIP TEST	mm	≤ 19.07 ± 0.5	19.0
25. DRAIN PRESSURE WHEN TRIPPED	kgf/cm <sup>2</sup>	≤ 3.52	2.17

#### 참고문헌

- 1) 한국표준형원전터빈 출력구동장치 및 시험장치 국산화개발 최종보고서, 지식경제부, 2008.
- 2) 보수지침서, "태안화력 3, 4호기", 한국전력기술 주식회사, 1997.
- 3) MIL-STD 721C, "Definitions of terms for

reliability and maintainability", 1966.

- 4) 산업자원부 기술표준원, "신뢰성용어 해설서", 2003.
- 5) Y. B. Lee, "A study on procedures of the accelerated life testing for hose assemblies", Key Engineering Materials, Part 3, pp. 297-300, 2005.
- 6) James A. McLinn, "Assuring hydraulic component reliability", NCFP, pp. 67-73, 2005.
- 7) 기계 부품(펌프 밸브) KIMM R&D 기획 최종보고서, Deloitte, 2009.

### [저자 소개]

이용범(책임저자)



E-mail : lyb662@kimm.re.kr  
Tel : 042-868-7151

1959년 4월 3일 생  
2006년 충남대학교 대학원 열 유체 전공 박사. 2008년 충남대학교 대학원 겸임교수로 재직중. 1987년 한국기계연구원 입사, 현재 유압기기 및 시스템 설계, 신뢰성 분야 연구

정 동 수



E-mail : jds667@kimm.re.kr  
Tel : 042-868-7154

1962년 6월 14일생.  
2007년 충남대학교 기계설계공학과 박사. 1990년 한국기계연구원 입사, 시스템신뢰성 연구실에서 유압기기 연구개발 및 기계류 부품 신뢰성평가 수행. 유공압시스템학회, 대한기계학회 등의 회원.