



원자력/화력 발전소의 특수밸브개발 및 신뢰성확보기술

이용범 | 한국기계연구원
양종대 | (주) 에네스코

[요약문]

원자력/화력 발전소에서 사용 중인 터빈출력제어장치(turbine power control device)는 유압 서보액추에이터(hydraulic servo actuator)로 구동하는 특수 스팀 밸브(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 최적량의 스팀을 공급하여야하고, 고속(화력 3600 rpm, 원자력 1800 rpm)으로 회전하는 터빈이나 스팀계통에 이상이 발생할 경우 터빈의 과속(over speed) 방지를 위하여, 즉시 터빈으로 공급되는 스팀을 차단하여 터빈을 보호해야한다. 따라서 터빈의 속도제어와 계통의 스팀 량을 감시하여 차단하는 발전소의 특수 밸브의 신뢰성확보기술이 요구된다. 특히 원자력발전소의 경우 핵연료교환주기(약 24개월)에 밸브들을 정비 또는 교체하고 있어 이때마다 시스템과 매칭(튜닝)기술이 요구되었다.

본 연구에서는 전량 수입에 의존했던 원자력/화력 발전소의 특수 밸브인 터빈출력제어장치의 국산화 개발과 신뢰성확보기술 효과에 대하여 논하였다.

1. 연구개발의 필요성

1.1 기술적 측면

터빈출력제어장치는 그림 1과 같이 원자력/화력 발전소에서 스팀터빈에 유체에너지인 스팀을 최적으로 공급하여 터빈을 회전시키고 이 기계적 에너지가 발전기를 구동하여 전기를 생산하는데 가장 핵심적인 기기라 할 수 있다.

고속(화력 3600rpm, 원자력 1800rpm)으로 회전하는 터빈은 스팀 량에 의해서 전기품질이 결정되고, 스팀계통이나 터빈에 이상이 발생할 경우에는 터빈의 과속 방지를 위하여, 즉시 터빈으로 공급되는 스팀을 차단하고 외부로 배출시켜서 터빈을 보호해야 한다. 따라서 터빈의 속도와 계통의 스팀 량을 감시하는 터빈출력제어기술과 신뢰성이 요구된다.

터빈출력제어장치는 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 실린더 및 밸브가 고착되는 고장발생 사례가 있기 때문에 신뢰성확보기술이 요구된다.

또한 터빈의 속도를 감시하고 규정 속도보다 초과속도(over speed)가 발생할 때 터빈을 비상 정지시키는 기계식 비상정지 밸브(MTV : mechanical trip valve)와 전기식(ETV : electrical trip valve) 비상정지 밸브 등이 있다. 대형 발전기를 구동하여 양질의 전기를 생산하기 위해서는 발전기에 연결된 고압 및 저압터빈에 최적 량의 스팀을 공급하여야하고, 고속으로 회전하는 스팀계통이나 터빈에 이상이 발생할 경우 터빈의 과속 방지를 위하여, 즉시 터빈으로 공급되는 스팀을 차단하여 터빈을 보호해야한다. 따라서 터빈의 속도제어와 계통의 스팀 량을 감시하여 차단하는 발전소의 특수 밸브의 신뢰성 확보기술이 요구된다. 특히 원자력발전소의 경우 핵연료교환주기(약 24개월) 때마다



다 밸브들을 정비 또는 교체하고 있어 이때마다 시스템과 매칭(튜닝)기술이 요구되었다.

전량 수입에 의존했던 발전소의 특수밸브인 터빈출력제어장치의 국산화 기술개발이 또 다른 발전소 핵심기인 터빈속도 감시 장치인 Front standard system과 시험평가 장비개발 동기를 마련하였다.

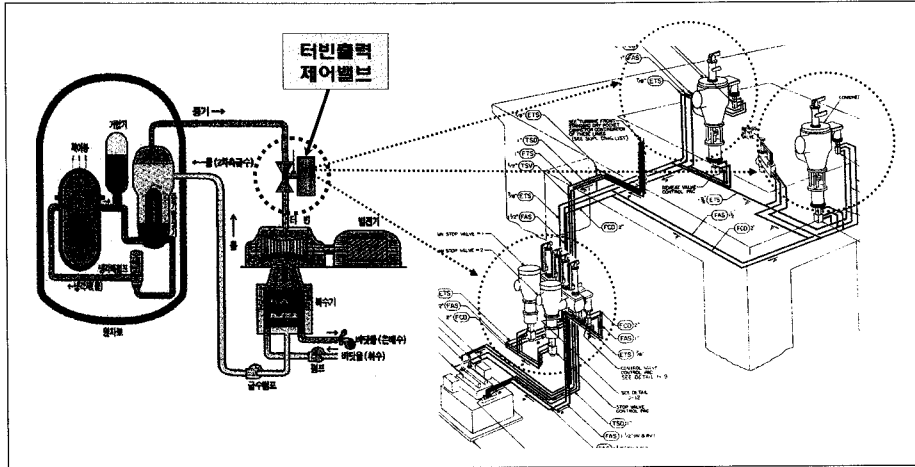


그림 1. 원자력발전소 터빈출력구동장치 계통도

1.2 경제 · 산업적 측면

현재까지는 원전 1기에 20개씩 설치된 터빈출력제어장치 전량을 선진국으로부터 수입에 의존함으로써, 높은 구매가격 및 유지보수 비용이 지출되었다. 따라서 수입 대체와 기술 자립화를 위하여 국내 기술진에 의한 국산화 개발과 신뢰성 평가를 통하여 제품에 대한 신뢰성을 확보하고, 전략적 수출 품목으로 육성이 필요하다.

터빈출력제어밸브는 그림 2와 같이 유압 서보액추에이터와 급속차단 밸브, 급속 배출밸브 및 스프링하우징 등으로 이루어지고 서보제어가 이용됨으로서 정밀기계산업 및 제어분야에서 기술축적에 따른 경제적 파급효과가 기대된다.

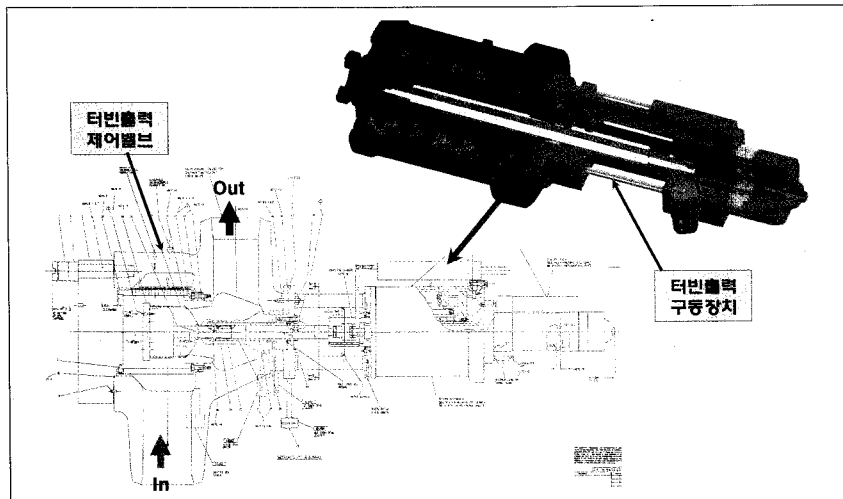


그림 2. 터빈출력제어밸브 및 출력제어구동장치

2. 연구 내용

2.1 국산화개발 개요

원자력/화력 발전소에서 사용되는 터빈출력제어구동장치의 국산화 개발을 위하여 선진국(미국 GE사) 제품을 벤치마킹(bench marking)하였으며, 첫째로 기하학적 특성분석을 위하여 치수측정 형상공차측정, 조립공차 측정, 표면조도 측정, 도금층 두께 측정을 하여 100% 호환(장착)이 가능하도록 하였고, 둘째로 물리적 특성분석을 위하여 중요 부품별 경도측정, 강도 측정, 탄성, 열처리 종류 및 방법 파악과 경화 층 깊이를 측정하였다. 그리고 화학적 특성분석을 위하여 재료의 화학성분 분석과 재료의 Code를 파악하였다.

터빈출력제어구동장치는 그림 3과 같이 단동형(single acting type) 유압서보액추에이터(hydraulic servo valve & actuator)구조를 갖고 있지만 급속배출밸브(dump disc valve)와 급속유량차단밸브(shutoff valve) 등으로 구성된 유압장치와, 고 강성 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.

시제품 및 양산품의 제작은 정밀가공을 기본으로 윤활과 실링(sealing)을 위한 각 부분별 최적의 틈새, 내구성과 부식을 고려한 열처리, 도금 및 도장을 하였고 발전소 정비로 다년간 숙련된 전문가에 의해 조립을 하였다.

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

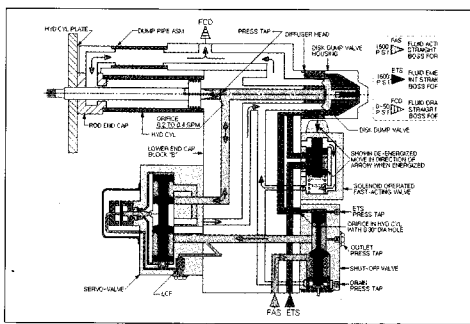


그림 3. 유압작동 계통도

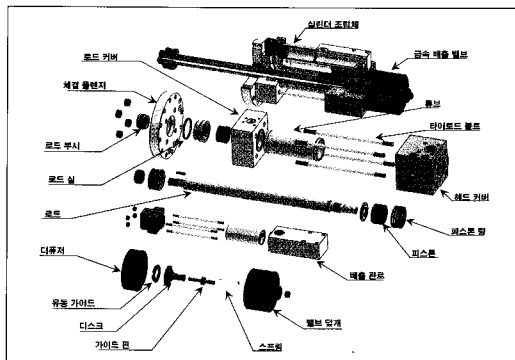


그림 4. 출력제어구동장치 구조도

2.2 제품설계

터빈출력제어장치의 설계는 그림 5와같이 3D-Modeling, FEM 해석 그리고 제작도면 순서로 진행 하였으며, Servo actuator, Dump disk valve, Shutoff valve, Spring housing 등에 대한 구조강도 (등가응력, 등가탄성 변형률, 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 고정되어있다 면, 면과 면이 접하는 부분은 결합된 것으로 가정하고, 재료는 탄소강과 실제사용 강재로 하였다.

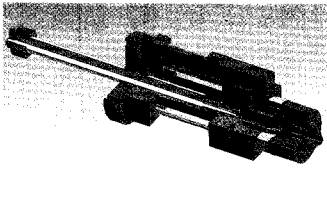

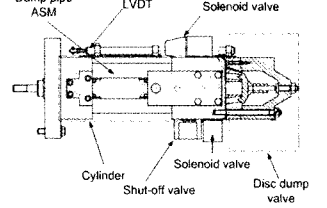
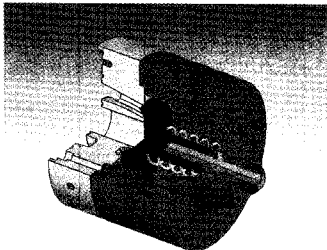
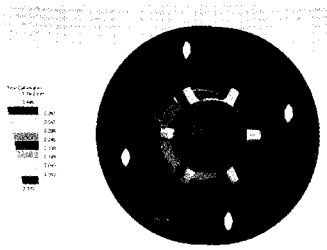
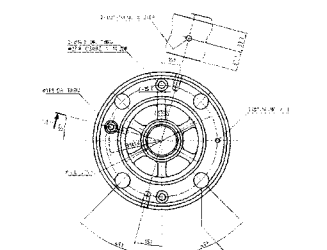
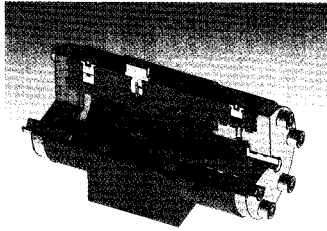
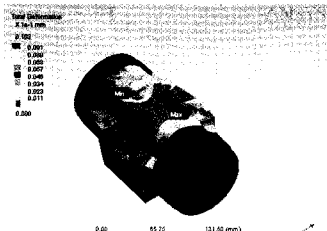
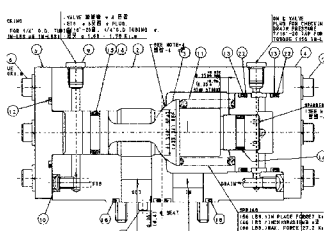
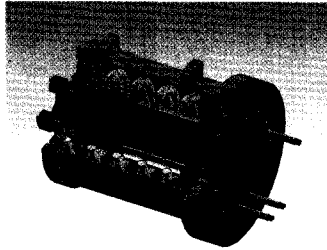
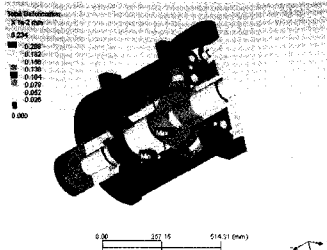
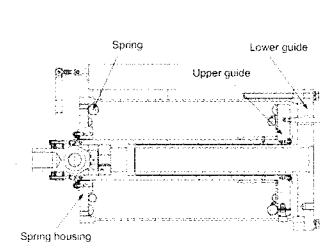
구분	3D modeling	FEM 해석	2D 제작도
Servo Actuator			
Dump disk valve			
Shutoff valve			
Spring housing			

그림 5. 터빈 출력제어기구동장치 3D modeling & FEM 해석

2.3 제품제작

국산화 개발품 제작은 현재 원자력 발전소 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 개선방안을 설계에 반영하여 그림 6과 같이 제작하였다.

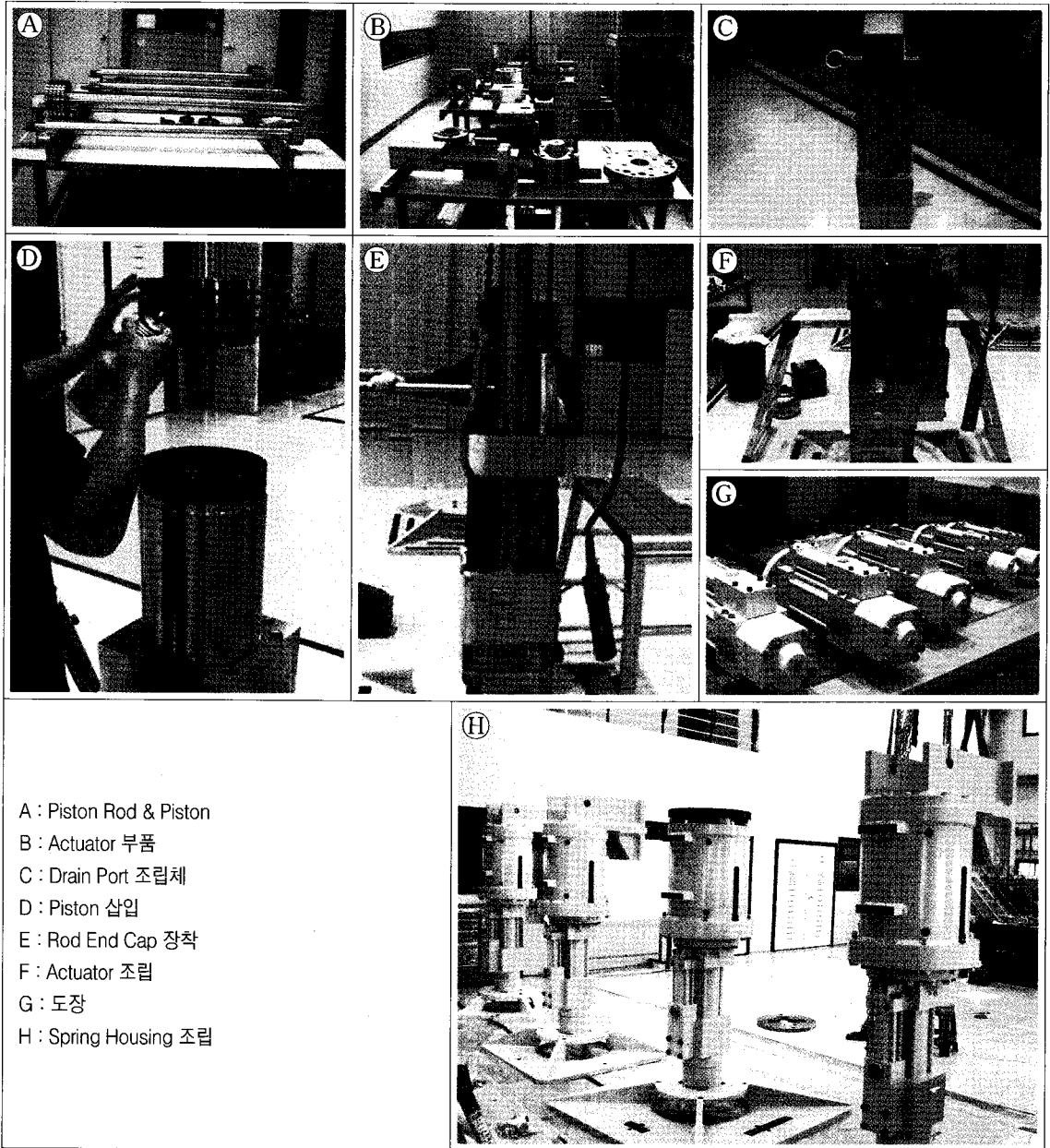
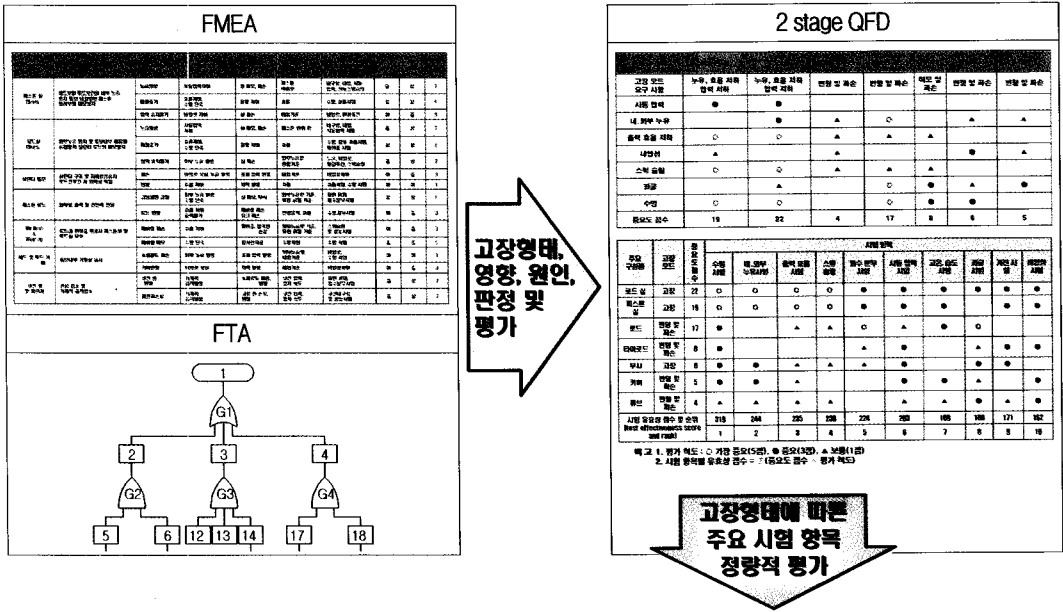


그림 6. 원자력발전소 터빈출력 구동장치 조립



2.4 Test Code 개발

터빈 출력제어구동장치의 Test code를 개발하기 위하여, 원자력/화력발전소 고장 사례를 통한 고장모드영향분석(FMEA: failure mode & effects analysis)과 치명도 매트릭스분석(CMA: criticality matrix analysis)을 실시하고, 결합나무분석(FTA: fault tree analysis)과 2단계 품질기능전개(2-stage quality function deployment)를 통하여 고장 형태에 따른 주요 신뢰성 시험항목(test code)을 결정하였다.



No	Test Item	Unit	Spec.
1	FAIL SAFE DIRECTION	Direction	Close
2	FAIL SAFE CLOSED TIME	sec	42.0±20
3	ACTUATOR HYSTERESIS	%	≤ 2.30
4	FASV INPUT SIGNAL	VAC	110, 220
5	FASV ON-OFF LEAKAGE (MAX)	LPM	≤ 1.0±0.2
6	FASV NORMAL LEAKAGE (AVERAGE)	LPM	≤ 0.2±0.1
7	SHUT-OFF VALVE ON-OFF LEAKAGE	LPM	≤ 0.1±0.05
8	SHUT-OFF EMERGENCY TRIP SUPPLY PRESSURE	kgf/cm ²	≤ 112.5
9	SHUT-OFF VALVE FLUID ACTUATOR SUPPLY PRESSURE	kgf/cm ²	≤ 112.5
10	IN PUT / OUT PUT CURRENT	± mA	16/48
11	TEST CLOSING TIME	sec	45±5.0
12	HYDRAULIC CLOSE END AVERAGE PRESSURE	kgf/cm ²	≤ 3.52
13	HYDRAULIC OPEN END AVERAGE PRESSURE	kgf/cm ²	25.7±6.4
14	DELTA P = (0.03 x OP. END) + 17.5 = ALLOW	kgf/cm ²	18.7±6.4
15	SOLENOID SHIFT TIME FOR TRIP TEST	sec	≤ 1.0
16	CYLINDER STROKE TIME FOR TRIP TEST	mm/sec	165.9±1.5
17	ACTUATOR CLOSED TIME AT EMERGENCY TRIP	sec	≤ 1.0
18	DASHPOT START POINT FOR TRIP TEST	mm	≤ 19.07±0.5
19	DRAIN PRESSURE WHEN TRIPPED	kgf/cm ²	≤ 3.52
20	SOLENOID CHARGING TIME	sec	≤ 3.52

그림 7. 시험항목 및 사양결정

2.5 시험장치 구축

시험장치 구축은 원자력/화력발전소에서 터빈 출력제어구동장치가 구동되고 있는 상황을 재현 할 수 있도록 블록 다이어그램(block diagram)을 작성하고, 각각의 기능과 성능을 검사할 수 있는 압력계, 유량계, 위치검출계(LVDT), 전압계, 전류계, 온도센서 및 키운터 등의 센서를 부착하고, 발전소와 동일한 조건으로 장착이 가능한 Modular mounting type 고 강성 시험기(test mechanism), 동적/정적시험이 가능하고 결과가 정성서로 출력되는 프로그램을 개발하였다. 따라서 발전소에서는 이 시험결과를 근거로 교환즉시 운전이 가능하도록 신뢰도를 높였다.

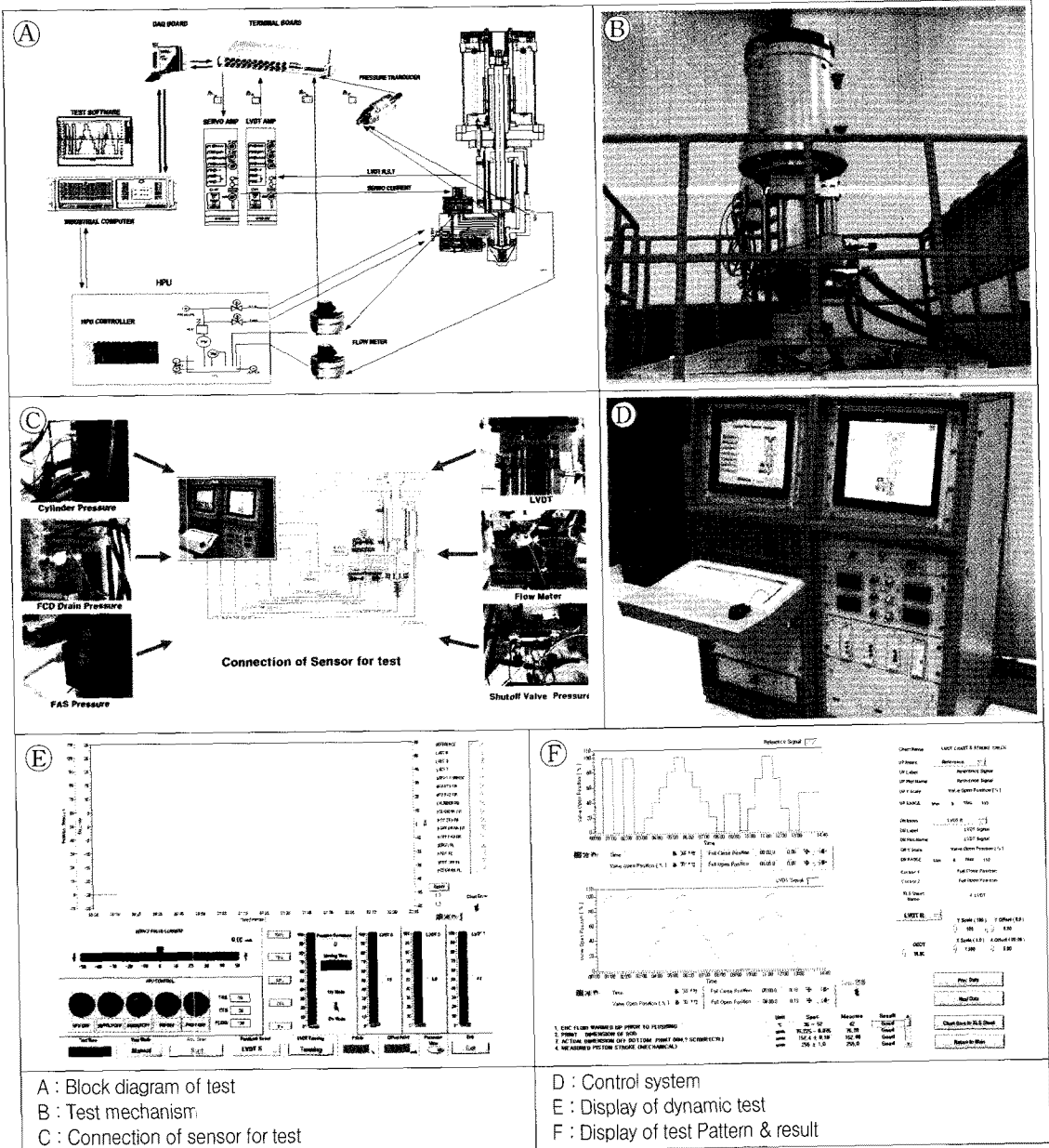


그림 8. 터빈 출력 구동장치 시험설비



2.6 시험평가

시험평가는 표1의 시험성적서와 같이 기본적인 외형치수, 액추에이터변위(stroke) 검사와 인사에스테르계열 유압 작동유를 이용한 청정도 유지(flushing), 고장안전성시험(fail safe test), 작동특성시험(trip characteristics test), 서보밸브 신뢰성시험(servo valve reliability test), 액추에이터성능시험, 작동시험, 급속작동솔레노이드성능시험(fasting acting solenoid performance test) 등 약 30항목의 중요 부분에 대하여 시험결과를 성적서로 발행하여 이 시험데이터를 근거로 발전소에서는 추가 시험을 하지 않고 즉시 사용이 가능하도록 하였다.

표 1. 시험성적서

BASIC DATA	UNIT	Spec.	MEASURE
1. EHC FLUID WARMED UP PRIOR TO FLUSHING	℃	36~48	44
2. PRINT DIMENSION OF ROD	φmm	114.32-0.076	114.29
3. ACTUAL DIMENSION OF CYLINDER BORE(5", 6", 8", 9"&10")	φmm	226.80-0.10	226.80
4. MEASURED PISTON STROKE(MECHANICAL)	mm	210-1.00	210
FAIL SAFE TEST			
5. FAIL SAFE DIRECTION	Direction	Close	Closed
6. FAIL SAFE CLOSED TIME	sec	42.0±20	28.6
7. ACTUATOR HYSTERESIS	%	≤ 2.30	1.13
TRIP CHARACTERISTICS TEST			
8. FASV INPUT SIGNAL	VAC	110, 220	110
9. FASV ON-OFF LEAKAGE(MAX)	LPM	≤ 1.0±0.2	0.76
10. FASV NORMAL LEAKAGE(AVERAGE)	LPM	≤ 0.2±0.1	0.02
11. SHUT-OFF VALVE ON-OFF LEAKAGE	LPM	≤ 0.1±0.05	0.04
12. SHUT-OFF EMERGENCY TRIP SUPPLY PRESSURE	kgf/cm ²	≤ 112.5	102.82
13. SHUT-OFF VALVE FLUID ACTUATOR SUPPLY PRESSURE	kgf/cm ²	≤ 112.5	104.92
SERVO VALVE RELIABILITY TEST			
14. IN PUT / OUT PUT CURRENT	± mA	16/48	48
15. NULL BIAS LEAKAGE(MAX)	LPM	≤ 6.72	4.27
16. BUSHING SPOOL ASSEMBLY LEAKAGE(AVERAGE)	LPM	≤ 2.30	0.25
17. NULL BIAS CURRENT	mA	≤ 3.40	2.12
PERFORMANCE TEST			
18. ACTUATOR POWER OUTPUT	KN	38.80~201.11	111.39
19. ACTUATOR OPERATION EFFICIENCY	%	80.06±1.5	80.05
TRIP TEST			
20. TEST OPENING TIME	sec	45±5.0	43.30
21. TEST CLOSING TIME	sec	45±5.0	43.30
22. HYDRAULIC CLOSE END AVERAGE PRESSURE	kgf/cm ²	≤ 3.52	2.90
23. HYDRAULIC OPEN END AVERAGE PRESSURE	kgf/cm ²	25.7±6.4	24.70
24. DELTA P = (0.03 × OP. END) + 17.5 = ALLOW	kgf/cm ²	18.7±6.4	18.2
25. SOLENOID SHIFT TIME FOR TRIP TEST	sec	≤ 1.0	0.87
26. CYLINDER STROKE TIME FOR TRIP TEST	mm/sec	165.9±1.5	
27. ACTUATOR CLOSED TIME AT EMERGENCY TRIP	sec	≤ 1.0	0.87

TRIP TEST	UNIT	Spec.	MEASURE
28. DASHPOT START POINT FOR TRIP TEST	mm	$\leq 19.07 \pm 0.5$	19.0
29. DRAIN PRESSURE WHEN TRIPPED	kgf/cm ²	≤ 3.52	2.17
FASV(Fasting Acting Solenoid) PERFORMANCE TEST			
30. SOLENOID CHARGING TIME	sec	≤ 3.52	2.17

3. 결 론

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

발전소 운영에서 발생하는 기술적 문제점을 제품개발에 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 구축됨으로써 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.

또한 터빈출력제어장치 국산화 및 종합성능평가시스템 개발의 기술축적 결과로 발전소 터빈에 직결되어 초과속도(over speed)를 감시하고 초과속도가 발생 할 때 터빈을 비상 정지시키는 “Front standard system과 종합성능평가시스템 개발”을 추진하게 되었다.

❁ 참고 문헌

- [1] 한국표준형원전터빈 출력구동장치 및 시험장치국산화개발 최종보고서, 지식경제부, 2008.
- [2] 발전소 계획예방 정비 지침, 서부발전, 2005.
- [3] 보수지침서, “태안화력 3, 4호기”, 한국전력기술주식회사, 1997.
- [4] MIL-STD 721C, “Definitions of terms for reliability and maintainability”, 1966.
- [5] 산업자원부 기술표준원, “신뢰성용어 해설서”, 2003.
- [6] Y. B. Lee, “A study on procedures of the accelerated life testing for hose assemblies”, Key Engineering Materials, Part 3, pp. 297-300, 2005.
- [7] James A. McLinn, “Assuring hydraulic component reliability”, NCFP, pp. 67-73, 2005.
- [8] 기계 부품(펌프 밸브) KIMM R&D 기획 최종보고서, Deloitte, 2009.



이 용 범

- 한국기계연구원 시스템엔지니어링 연구본부
- 시스템신뢰성연구실 책임연구원
- 관심분야 : 발전소 유압시스템, 건설기계
- E-mail : lyb662@kimm.re.kr



양 종 대

- (주) 에네스코 대표이사
- 관심분야 : 발전설비, 유압시스템, 에너지 시스템
- E-mail : yjd@enesco.co.kr