

발전소 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터 손상 저감 기술 Damage Reduction Technology of Turbine Valve Hydraulic Actuator for Power Plant

양 천 규
C. K. Yang

1. 서 론

원자력 및 화력 대용량 발전소의 터빈은 대형 발전기(Generator)와 직결되어 고속 회전하여 전기를 생산한다. 터빈의 회전력은 유입 증기량에 의해 결정되며 유입 증기량은 터빈 증기 조절밸브(Steam Valve)를 통해 조절된다. 증기 조절밸브의 개도를 조절하는 구동력은 고출력의 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터(Turbine valve hydraulic actuator)에 의해 발생되며, 터빈 보호를 위해 발전설비의 고장과 같은 터빈 보호신호 발생 시 터빈증기 조절밸브가 급속전폐 되도록 하는 설비 보호 역할을 가지고 있다. 이와 같이 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터는 터빈 유입 증기량 조절 및 터빈 보호기능을 가진 핵심설비이며, 고도의 신뢰성이 요구되는 기기이나, 발전소 운영 특성상 고온부에서 동작되며, 장기간 운전이 가능하여야 하는 가혹 조건에서 사용되는 특성상 일반적인 산업계에서 사용되는 유압 액추에이터에 비해 손상도가 높다. 본 해설에서는 전량 수입에 의존하던 터빈 밸브 구동용 유압 액추에이터의 국산화를 수행하며 동반 연구된 발전소 터빈밸브 구동용

유압 액추에이터의 손상 저감기술에 의하여 서술하였다.

2. 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터 구조 및 특성

2.1 터빈밸브 구동용 유압액추에이터 구조

그림 1에 나타난 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터는 단동형 유압 액추에이터로 터빈 증기 밸브와 링크(Link) 또는 직결의 형태로 설치되며, 주요 구성 부품은 실린더(Cylinder), 피스톤 헤드(Piston Head), 피스톤 링(Piston Ring), 실린더 앤드캡(Cylinder End Cap), 피스톤 로드(Piston Rod), 로드 밀봉장치(Rod Seal), 급속 전폐밸브로 구성되어 진다. 동작은 실린더 하부에 유압 작용시 로드나오는 방향으로 동작하며 유압 제거시 로드나 들어가는 방향으로 동작한다.

특이 구조로는 실린더 앤드캡(End Cap) 하부가 관통되고 관통부에 급속전폐밸브(Disc Dump Valve)가 설치되어 비상 신호 입력시 급속전폐밸브가 개방되면 실린더 앤드캡의 관통홀을 통해 실린더 내부의

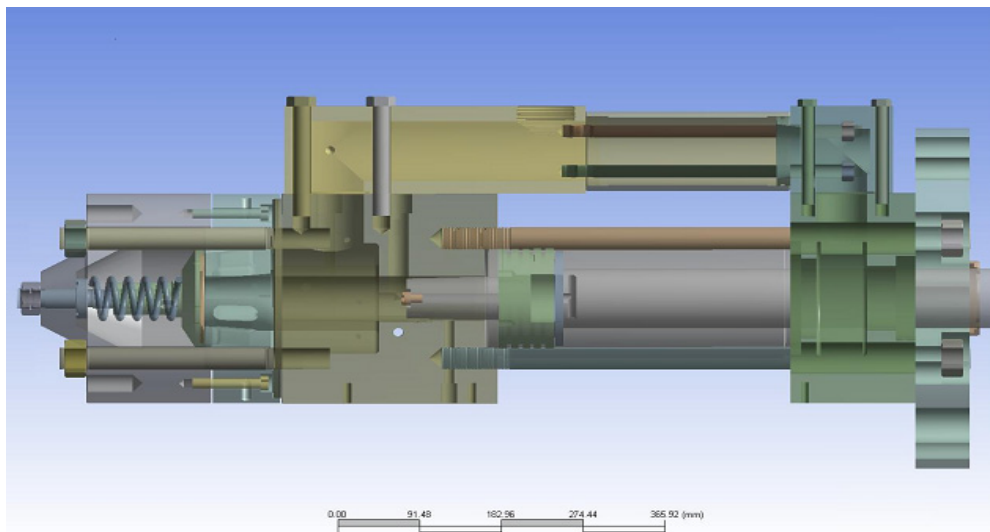


그림 1 터빈 밸브 구동용 유압 액추에이터 구조

작동유를 급속 배유시켜 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터와 직결된 증기밸브를 급속 전폐하여 터빈으로 유입되는 증기를 차단하는 구조로 되어있다.

2.2 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터 동작 특성

터빈밸브 구동용 유압 액추에이터는 서보밸브(Servo Valve)와 방향 전환형 솔레노이드 밸브가 설치되는 형태로 구분되며 서보밸브가 장착되는 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터는 유입 증기량의 미세 조절에 사용된다. 발전소 운영 특성상 발전소 출력은 장기간 동일하게 운영되며, 이때 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터는 장기간 동일 위치에 고정 운전되게 되며, 링크(Link)를 통해 동작되는 유압 액추에이터 동작 특성상 좌굴 현상에 의한 하중의 집중 현상이 발생되게 된다. 이때 장기간 미동작 상태로 유지된 유압 액추에이터의 피스톤링과 실린더 내벽의 유체 윤활막이 감소되게 되며 윤활상태에서의 경계 윤활층의 천이 현상이 발생되게 된다. 또한 정기적으로 수행하는 터빈 밸브 Test는 터빈밸브에 대한 급속 Open 및 Close를 수행하여 터빈밸브의 고착 방지 및 정상적인 동작 유무를 확인하나 정기적인 터빈밸브 Test시 경계 윤활 상태에 도달되어 있는 실린더 내면과 실린더와 급속 접촉이 발생되며 실린더 내부에서 시저 현상과 같은 손상을 유발하게 된다.

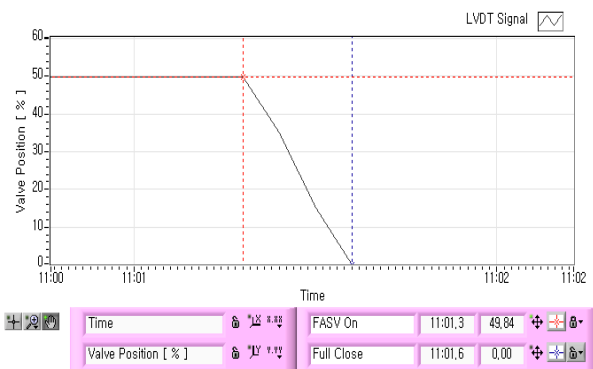


그림 2 급속 전폐시험 그래프

2.3.1 경계 윤활 및 시저 현상에 따른 손상

터빈밸브 구동용 유압 액추에이터의 손상형태 분석 시 경계 윤활 발생에 따른 실린더 손상, 경계 윤활 확대에 따른 시저현상에 의한 실린더 손상 및 유팩킹 및 피스톤 로드(Piston rod) 손상으로 크게 구분되어 진다. 그중 심각도가 높은 실린더 손상의 주원인으로는 경계 윤활 발생에 따른 실린더 손상이

있으며, 경계윤활 발생을 방지하기 위한 방법으로는 윤활 접촉면적을 크게 하거나 표면 조도 상승을 통한 하중의 집중을 회피하는 방안이 있으나, 터빈 밸브 구동용 유압 액추에이터의 경우 링크와 연결되어 지속적인 미스 얼라이먼트가 발생되며 고온부에 설치되는 기기 특성상 윤활층 천이에 따른 경계 윤활 상태로의 천이가 용이하게 된다.

2.3.2 과도 운전조건에 따른 손상

터빈 밸브 구동용 유압 액추에이터의 피스톤 로드 실은 유팩킹(U-Packing)이 사용되게 된다. 유팩킹은 일반적인 밀봉재로 널리 사용되고 있으나, 현행 적용된 유팩킹은 고온 최고 허용 속도가 500mm/Sec(표.1 참조)로 고속 동작에는 적합하지 않는 특성을 보인다. 대용량 발전소의 긴급정지를 위한 터빈밸브 급속 전폐시 전폐 시간은 약 0.3 Sec 가량 소요되며 피스톤 이동 속도는 900mm/Sec 가량 형성되는 것을 그림 2의 시험결과로 알 수 있다. 이와같이 고속 행정 시에 발생된 유팩킹과 더스트 실(Dust Seal)의 손상(그림 3, 4)은 외부의 이물질이 유압 실린더내로의 침입이 용이하게 되며 경질의 이물질에의 어브레시브 마모와 같은 급속 마모를 유발한다.

표 1 팩킹의 고온 허용 피스톤 속도

패킹재료	패킹 모양	최고 허용속도mm/S
니트릴 고무 우레탄 고무 불소 고무	V 팩킹 L 팩킹 U 팩킹 X 팩킹 O 팩킹	500
천을 넣은 고무 (불소고무)	V 팩킹 L 팩킹 U 팩킹	800
천을 넣은 고무 (니트릴 고무)	팩킹 L 팩킹 U 팩킹	1000
4불화에틸렌	조합실(S)	1000

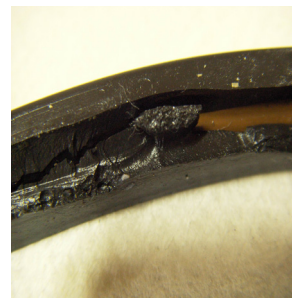


그림 3 유팩킹 박리손상

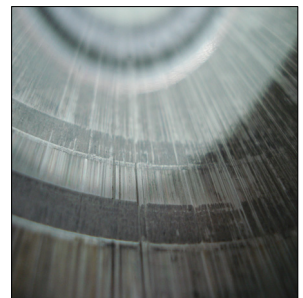


그림 4 실린더내면 손상

3. 터빈밸브 구동용 유압 액추에이터 손상 저감 기술 개발 방향

터빈밸브 구동용 유압 액추에이터의 동작 환경 및 조건에 적합한 손상 저감 기술을 분석한 결과 금속 재 피스톤링을 대체하는 비금속 재료를 이용한 밀봉 기술이 적용이 검토되었다. 그중 플라스틱 재료는 자기 윤활성을 가짐과 동시에 성형성이 우수하고 첨가제에 따라 다양한 성능을 발휘하는 것이 입증되었다.

터빈 밸브 구동용 유압 액추에이터의 주 손상 원인은 장기 미동작에 따른 윤활막 상실에 따른 경계 윤활 발생과 이어지는 시저 현상이므로 적절한 충전제가 보강된 폴리 테트라 플로로 에틸렌(PTFE) 재질의 조합실 사용하고 PTFE 에 함침하고자 하는 고체 윤활제(흑연, 이황화몰리브덴, 브론즈)를 첨가하여 윤활특성을 향상시켜 내마모성 및 윤활특성 향상을 추진하였다.

시제품 기술 적용 결과 장기 미동작 및 급속 전폐 시에도 경계윤활에 따른 실린더의 손상이 발생하지 않았으며, 동작 환경에 따른 윤활막의 감소현상 또한 발생하지 않았으며, 연질의 조합실을 사용하므로 경질의 이물질이 발생하여도 조합실에 압입되어 추가적인 손상이 방지되었다.

표 2 선정된 충전제 조건

특성	조건	선정 결과
트라이볼로지	내마모성 마찰계수 자기 윤활성	PTFE+Griphite
기계적 성질	내압축 강도 내충격 강도 고강도 베어링	PTFE+Griphite &Bronze
화학적 성질	인산에스테르 오일	PTFE+Griphite &Bronze
열적 성질	고온부 작동	PTFE+Griphite &Bronze

4. 손상 방지 기술 개발, 적용 및 시험

4.1 손상 방지기술 개발

터빈 밸브 구동용 유압 액추에이터의 손상 저감을 위해 경계윤활이 발생하지 않는 조합실이 적용된 실린더 밀봉기술&로드부 밀봉기술(Cylinder sealing system & Piston rod sealing system) 적용하여 시

험하였다. 적용 기술은 압력 보상형 밀봉기술로 유압이 주 밀봉재작용시 유압이 반경반향으로 작용하며 유압셀이 팽창하여 밀봉기능을 수행하며, 고강도의 손상방지링(Wear detector ring)을 추가 적용하여 급속접촉을 방지하였다. 적용기술은 그림 5, 6, 7과 같다.

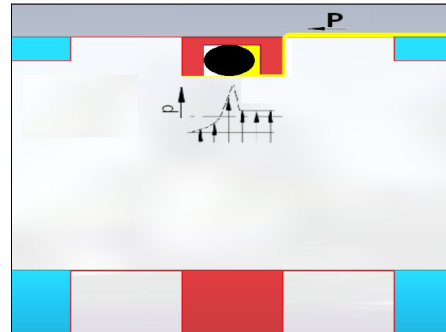


그림 5 유압 작용시 실린더 밀봉 형태

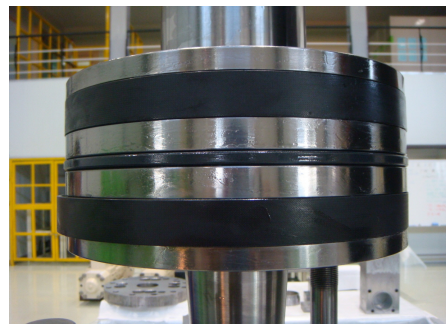


그림 6 실린더 밀봉 기술

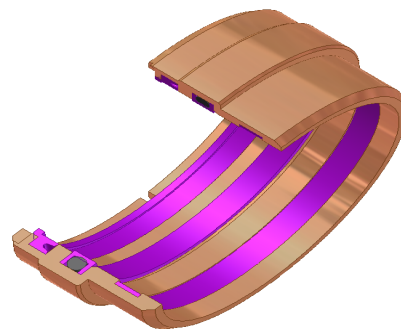


그림 7 로드부 밀봉 기술

손상 방지 기술을 적용한 결과 장기 미동작시 및 미스얼라이언트에 의한 경계 윤활 및 윤활층 천이에 따른 금속 접촉이 방지되었으며, 압력보상형실의 우수한 밀봉기능을 통해 내부누설이 감소되었다. 또한 손상 방지링은 링크로 연결된 증기밸브에서 오는 미스얼라이언트를 베어링 기능으로 보정하도록 하였으며, 실린더 및 로드부 밀봉기술에 동일하게 적용하였다.

표 3 터빈 밸브 구동용 유압 액추에이터 평가 기준 및 시험 결과

평가항목	평가방법	평가 기준	시험 결과	비고
실린더 앤드캡 외부 누유 (내압성 시험)	· 유압 액추에이터의 헤드부에 유압을 22.4 MPa(상용압력 200%)로 2 분간 가압하여 누설 상태 및 부품 파괴, 변형 상태 확인	누설 및 파괴가 없을 것	누설 및 파괴 없음	
실린더 내부누설 (내부 누유시험)	· 헤드부에 유압을 11.2 MPa 10 분간 가하여 100% 전개 상태 시 내부 누설량을 유량계 또는 메스 실린더로 측정(피스톤 헤드 오리피스는 폐쇄 상태)	15 L/min 이하	누유 없음 (0 L/min)	
로드부 외부 누유	액추에이터 전 행정거리의 90% 이상으로 피스톤 행정 1,000회 왕복 운동 후 와이퍼 부분 누유총량 측정	누설없음	누설 없음	
히스테리시스 및 직선성 시험	유압 액추에이터 0~75% Open시 신호 검출기 측정값과 100%~75% Close 시 신호 검출기 측정값 비교 측정은 5회 이상	1. 5% 이하	히스테리시스 0.021% 직선성 0.016%	
최저 동작 압력시험	· 액추에이터를 시험장비에 수평으로 설치 후 유압을 가압하여 검출기의 위치신호 출력시 압력 측정 · 작동이 원활하고 소음이 없어야 함.	0.9 MPa 이하	0.040 MPa	
압력 드리프트	피스톤내 유압 가압시 부재 및 검출기의 변형에 따른 편차를 기계적 스트로크와 비교	0mm	0mm	
급속 배유 밸브 기밀성	누설시험장치 장착 후 11 MPa 가압 후 매 10분간 압력 저하 측정(30분간)	0.1 MPa 이하	0 MPa	
내부 통과유량 시험	· 액추에이터를 전진시켜 정지되도록 한 후 로드부의 배관을 열고, 헤드부에 유압을 11.2 MPa 가압하고 헤드의 오리피스를 통과하여 흐르는 유량을 유량계 또는 메스 실린더로 기록 (피스톤 헤드 오리피스 설치)	0.75~1.5 L/min	0.75 ~1.5 L/min	
시동 압력 시험	· 최저작동압력 시험을 완료한 액추에이터의 헤드부에 압력을 서서히 공급하여 로드 측 포트에서 누출되는 기름이 0.05 mL/s 이상 될 때의 압력을 측정	0.6 MPa 이하	0.42 MPa	
수명 시험	· 액추에이터 헤드부에 상용압력 및 정격속도가 가해지도록 부하제어밸브를 조정 후 행정거리 (90±5) %에서 방향을 절환, 1.8× 10 ⁵ cycle(약 970 km)까지 수명시험을 실시	동작시 이상이 없을 것	이상 없이 작동함 (내부누유 없음)	

4.2 손상 방지기술 시험

이 기술의 신뢰도 보유 확인 및 수명 예측을 통한 발전 설비 적용 가능여부를 확인하기 위한 다양한 시험을 수행하였으며, 수행된 주 시험은 내구성 및

내환경 시험을 수행하였다. 성능시험은 유압액추에이터의 성능시험 [RS B 0099 기준], 직선성 및 히스테리시스시험 [KS B 6517, JIS 기준]으로 수행되었으며, 수명시험은 실제 현장 작동조건(내구수명)을 참

조하여 적용하였다. 가장 최근에 동일한 조건으로 생산된 양산품 중 2개를 랜덤 샘플링하여 활용하였으며, 시험 내용 및 결과는 표 3과 같다.

5. 개발 결과

터빈밸브 구동용 유압 액추에이터 손상 저감기술을 적용하여 제작한 시제품에 대한 성능시험을 수행하였으며, 시험 결과 시험 항목에 대해 우수한 성능이 입증되고 경계 윤활 발생 방지에 따른 터빈 밸브 구동용 유압 액추에이터의 손상이 저감되었다. 그중 내구 수형 시험의 경우 970 km 행정시험에도 시저 현상과 같은 손상은 발생하지 않았다. 개발품은 국내 대용량 원자력 화력 발전소에 현장 적용되어 사용되고 있다.

참고 문헌

- 1) 한국표준형원전터빈 출력구동장치 및 시험장치국산화개발 최종보고서, 지식경제부, 2008.

- 2) 발전소 계획예방 정비 지침
- 3) 보수지침서, "태안화력 3, 4호기", 한국전력기술주식회사, 1997
- 4) 산업자원부 기술표준원, "신뢰성용어 해설서", 2005
- 5) 電子-油壓 制御-세화
- 6) 트라이 볼로지 특성-대광서림

[저자 소개]



양 천 규 (책임저자)
 E-mail : yang1009@enesco.co.kr
 Tel : 042-671-2141~3
 1962년 9월 20일생
 1994년 한밭대 기계공학과 졸업
 1987년 한전KPS(주) 입사
 2007년 (주)에네스코 입사

2008년 터빈밸브 유압 액추에이터 국산화 개발(NEP) 및 동특성 성능진단장치, 정비기술개발 (NET), 터빈밸브 유압 액추에이터 진단, 정비 관련 특허 등록, 유압 SEAL HANDBOOK, CONTROL PAC 성능진단 분석기술 등 기술서 발간