

화력발전소의 축밀봉장치의 개선을 통한 터빈효율의 평가에 관한 연구

권영수* · 서정세**

A Study on the Turbine Efficiency through the shaft packing improvement of New Fossil Power Plant

Y.S. Kweon and J.-S. Suh

Key Words: Steam Turbine(증기터빈), Heat Rate(열 소비율), Efficiency(효율), Gland seal packing(증기밀봉장치), Positive pressure variable clearance packing(정압가변간극 패킹)

Abstract

The main reason for applying positive pressure variable clearance packing in fossil power plant is high efficiency and energy saving movement in the government. This study intends to analyze the turbine efficiency through the shaft packing improvement in thermal power plant and makes its comparison to that of the used packing.

1. 서론

최근의 증기터빈은 고압/중압터빈, 저압터빈(A), 저압터빈(B)로 구성되는데 증기터빈의 축밀봉장치는 케이싱과 축의 간극을 통해 흐르는 증기량을 제한하여 케이싱내에서의 증기누설 및 공기의 유입을 방지하기위한 설비로써 “고정형 패킹”으로 설치되어 있었으나, 고정형의 패킹의 설계간극은 터빈 임계속도시 발생하는 진동을 기준으로 간극이 설정되므로 정상운전중 진동이 양호한 경우라도 큰 간극을 유지하기 때문에 증기 누설손실이 증가하여 증기터빈 내부효율이 감소하였고, 패킹의 누설량 과다로 터빈 각 단(stage) 날개의 동익 및 고정익에서 열손실이 유발되었다. 또한 삼천포화력 제1,2호기는 준공후 운전년수가 약 17년 경과함에 따라 패킹 교체주기에 도달하였다.

상기와 같은 문제점을 해결하고자 최근 해외에서 개발.사용되고 있는 가변간극형 패킹(Variable Clearance Packing)을 채용하여 개선하였다.

본 연구에서는 실험 대상인 삼천포화력 발전소 제1,2호기의 고정형과 가변형 증기 패킹의 설치전 후 터빈성능시험을 통해 터빈효율을 비교, 검토하여 터빈 효율을 분석, 에너지 효율을 평가하고자 한다.

2. 축밀봉 장치의 문제점 및 개선

대용량 화력발전소중 Table 1은 삼천포화력1,2호기의 설비 규격을 나타낸다.

축밀봉 장치는 Fig.1과 같이 터빈축이 케이싱을 관통하는 부분에 설치되어 있고 설치목적은 케이싱과 축의 간격을 통해 흐르는 증기량을 제한하여 케이싱내에서의 증기누설 및 공기의 누입을 방지하는 장치이다. Labyrinth Packing은 터빈축에서부터 N-1/2/3/4/5/6로 호칭을 하며 특히 ,N-2 Packing은 Fig.2와 같이 HIP 터빈 중앙에 설치되어 있고 Fig.3은 터빈내부에서 축밀봉증기의 흐름을 나타낸다

Gland Packing(Labyrinth Packing)은 터빈 케이싱과 회전축(Rotor)간의 일정간격을 유지하여 증기의 흐름을 제한하고 각 터빈 Gland를 통한 증기의 누설방지 및 저압터빈 내부로 공기유입을 방지하는 역할을 하고 있다.

*정회원, 한국남동발전(주)

**정회원, 경상대학교 수송기계공학과

jssuh@nongae.gsnu.ac.kr

Table 1 Facility specification

구분	규격
형식	충동터빈, 4류식, 복수, 재생재열
정격출력	562,982 kw
회전수	3600 rpm
Steam Condition	o 주증기 압력 : 168.7 kg/cm ²
	o 주증기 온도 : 537.8 °C
	o 재열증기 온도 : 537.8 °C
	o 복수기 진공도 : 21.9 mmHg
터빈단수 (Number of Stage)	o 터빈단수 (Number of Stage)
	- 고압(HP)터빈 : 6단
	- 중압(IP)터빈 : 5단
	- 저압(LP)터빈 : 6단 × 4 Flow
제작사	GE社 (美國)
준공년도	o 제1호기 : 1983년
	o 제2호기 : 1984년

그 구조는 Fig.4와 같이 터빈 Rotor에 Teeth를 가공하고 고정부에는 Segment Ring을 설치하여 Labyrinth형식으로 증기를 교축시키는 방식이며, 또한 Segment Ring 배면에는 Leaf Spring이 항상 Rotor 중심방향으로 힘을 가하여 일정간격을 유지할 수 있도록 설치되어 있다.

이 패킹은 누설증기에 교축작용을 주는 것이므로 반경방향으로 약간의 틈새를 가진 Teeth를 집중적으로 배치되어 있다.

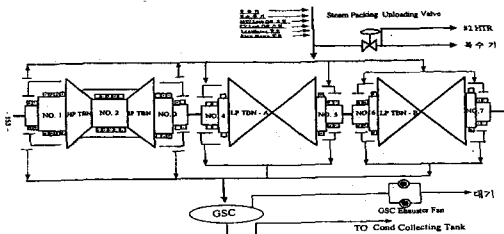


Fig.1 Grand seal steam system

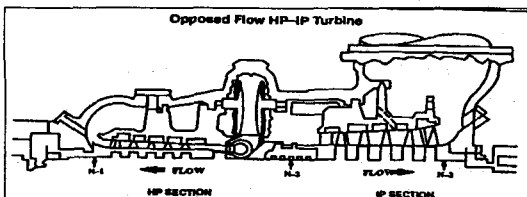


Fig.2 N-2 Packing position

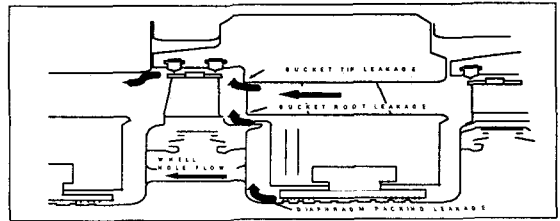


Fig.3 Seal steam flow of N-2 packing

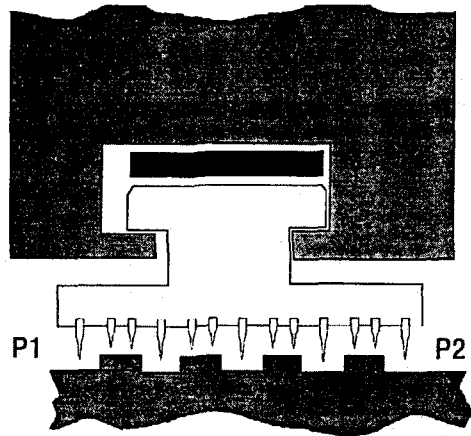
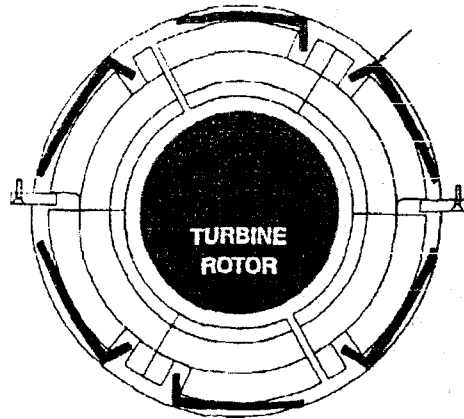


Fig.4 Standard(fixed) packing section

이러한 Teeth는 증기의 흐름에 대해 저항이 되어 누설량을 크게 감소시키며 회전부분은 축에 직접 가공된 홈이 있고 정지부분에는 Teeth형의 링 조각(Ring Segment)으로 되어 있다. Ring Segment

는 운전온도에 의해 팽창하여도 주위 부분을 완전히 보호할 수 있도록 이음새에 적당한 간극을 두어 가공되었다. 패킹의 Teeth는 기계 가공된 홈에 끼워 부하 변동중에 축방향의 접촉이 일어나지 않도록 되어있고, 터빈 운전상태에서 축과 패킹의 심한 손상방지를 위하여 Ring Segment 배면에 Leaf Spring이 설치되어 있다. Packing은 온도에 따라 재질이 다른데 Table 2는 증기온도에 따른 Packing 재질을 나타낸다.

고정형 패킹 설계간극은 터빈 임계속도시 발생하는 진동을 기준하여 간격이 설정되므로 정상 운전중에는 진동이 양호한데도 큰 간격을 유지하기 때문에 증기누설 손실이 증가하여 터빈 내부효율이 감소하며, 패킹의 누설량 과다로 각 단 날개(Stage Blade)의 증기양 부족을 초래하여 동익 및 고정익에서의 2차적인 열손실이 유발된다.

Table 2 Packing ring material

구분	규격		비고
형식	Steam Seal Labyrinth		
설치수량	7 Sets/Unit		
재질	저온 (400°C 이하)	Bronze합금 (Ni-Bronze)	N4~N7 Packing
	고온 (400°C 이상)	B50A173 (Cr-Mo강)	N1~N3 Packing
Spring재질	Inconel-X 특수합금		Leaf Type

고정형 패킹은 (Standard Packing)은 구조적으로 간격 조정이 불가능하며, 항상 Rotor 중심방향으로 힘이 작용하므로 터빈 기동초기 즉 고·중압 터빈 로타(Rotor)의 임계속도(Critical speed)부근에서나 수증기 온도변화시 Fig.5와 같이 로타와 패킹 링(Packing Ring) 간에 간극이 감소된다.

고정부와 회전부 사이에 마찰(Rubbing) 현상이 발생될 수 있으며, 터빈 rubbing 상태에서 계속 운전하면 로터 휨 현상 및 패킹손상의 원인이 된다.

터빈내부의 증기가 대기나 저압측으로 방출되는 것을 방지하는 패킹의 밀봉능력은 Packing Teeth와 Rotor간에 유지되는 간극에 좌우되며, 터빈효율을 최대화하기 위해서는 간극이 최소화되어야 하나 터빈을 기동하는 동안에는 진동에 의한 회전부와 고정부의 접촉에 의한 마찰(Rubbing)을 방지하기 위해서는 Packing Ring의 간극을 크게 하는 것이 좋다.

터빈에 사용되는 일반패킹은 Seal 간극이 고정되어 간극이 조절되지 않으나, 가변간극 패킹은 Fig.6 Fig.7과 같이 출력 약 25%이하에서는 패킹 간극이 Open상태로 유지하여 Rubbing을 사전에

예방하고 25%이상 부하에서는 설계간극을 유지함으로써 누설 손실방지에 따른 열효율 향상 및 반영구적 사용으로 차기 투자비를 절감하는 장치로서 해외 전문 제작사 (미국, GE사)에서 개발 적용하여

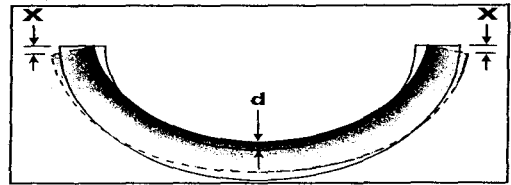
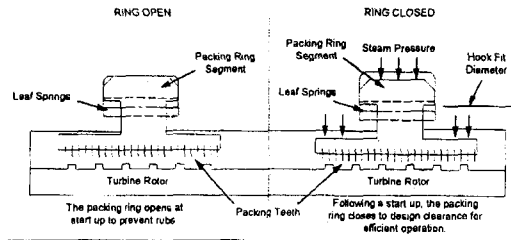


Fig.5 Packing ring movement in thermal expansion



(25%이하부하시 운전) (25%이상부하시 운전)

Fig.6 Function diagram of variable packing

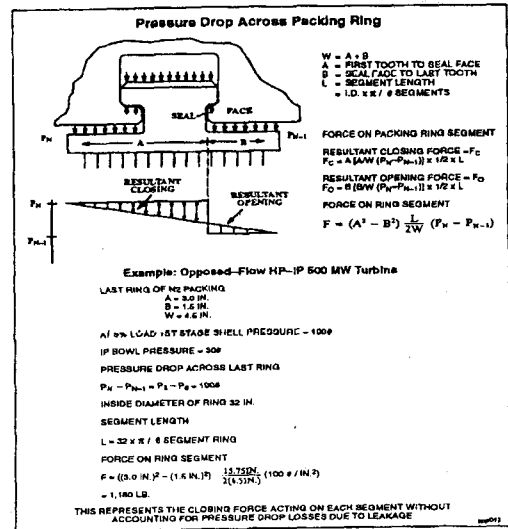


Fig.7 Internal steam press change of variable packing in normal operation

Table 3 Variable packing character

구분	특성
정식 명칭	Positive Pressure Variable Clearance Packing
Spring 종류	Leaf Spring
원리	Diaphragm에 5/8 inch의 구멍을 뚫어 패킹 배면(Backside)에 증기압력이 가해지도록 함.
개조실적(미국)	40여개의 터빈에 적용
제작사	GE사 (미국)
성능보증 조건 (정격출력 560MW기준)	절감 열소비율 9.83kcal/kwh (터빈효율 0.23% 향상, 제작사 제시사항)

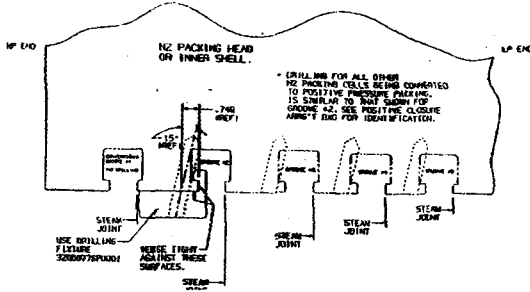


Fig.8 No. 2 packing casing boring diagram

신뢰성이 입증된 신기술이다. Table.3은 가변간극 패킹의 특성을 나타낸다.

정압가변간극 Packing(Positive Pressure Variable Packing)형태로 일정간극 유지를 위한 장치로서 Leaf Spring을 사용하고 Fig.8과 같이 증기압력도입을 위해 다이어프램(Diaphragm)에 구멍을 뚫어 개조하였다.

3. 실험 결과

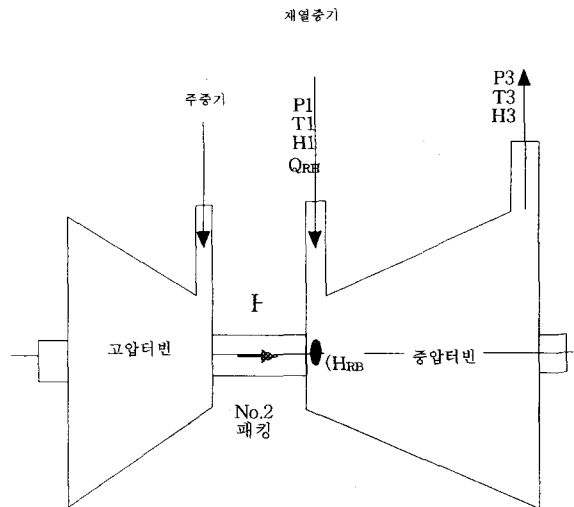
3.1 패킹 누설량 측정

N2 Packing 누설량 시험은 증압터빈 내부효율변화를 이용한 간접측정 방법으로 한전 전력연구원에서 시행하였다.

시험원리 : 증압터빈 내부효율계산 결과의 오차 변화

- 주증기 온도 ↑, 재열증기 온도 ↓ ⇒ 오차감소
- 주증기 온도 ↓, 재열증기 온도 ↑ ⇒ 오차증가

이 시험은 고압터빈의 증기가 증압터빈으로 누설되는 증기량을 측정하는 목적으로서, Fig.9와 같이 출력 500MW 부하에서 주증기 온도 538℃, 재열증기 온도 538℃를 유지한 상태에서 1회의 시험을 시행하고 동일 출력에서 주증기온도 510℃, 재열증기 온도 538℃, 주증기 온도 538℃, 재열증기 온도 510℃를 유지한 상태에서 각각 1회씩 시험을 시행하여, 고.중압 터빈 입출구에서 측정된 온도, 압력에 의해서 산정되는 3회의 증압터빈 엔탈피강하로 효율(내부효율)이 누설량의 변화에 따라 어떠한 경향을 띄면서 변화되는가를 그래프상에 plot하여, 3회의 시험결과와 교점이 누설량이 된다는 특성을 이용하였다. Packing 교체 전.후의 누설시험 결과는 Fig.10-13과 같이 나타내고 Table.4는 N-2 Packing 교체 전.후의 최종 결과를 나타낸다.



※

- P1 = 재열기 입구 증기압력 P3 = 재열기 출구 증기압력
- T1 = 재열기 입구 증기온도 T3 = 재열기 출구 증기온도
- H1 = 재열기 입구 증기엔탈피 H3 = 재열기 출구 증기엔탈피
- H2 = No.2 Packing 누설증기 엔탈피
- QRH = 재열기 입구 증기유량
- HRB = 재열기 Bowl에서의 증기 엔탈피

Fig.9 Measuring diagram of leak steam quantity

Table 4 N-2 Packing leak quantity(단위:%)

구 분	개조전	개조후	개조대비
제1호기	5.36	3.22	-2.14
제2호기	8.29	3.42	-4.87

3.2 누설시험 결과

Fig. 10-13은 제 1호기와 2호기의 교체전후의 누설률을 나타내었다. 터빈 효율향상을 위한 계획에 방 정비공사 기간중 작업사항은 본 건 외에도 동익 및 노즐표면 스케일제거 작업등에 의한 효율향상 부분도 있으므로 Table 5~6과 같이 순수한 가변간극패킹 교체에 따른 효과를 분석하기 위하여 터빈 동익 및 노즐표면 스케일제거 작업 후 성능진단한 제 1 호기는 '98년도 성능 시험치, 제 2호기는 '95년도 성능시험 결과치를 비교자료로 사용하였다.

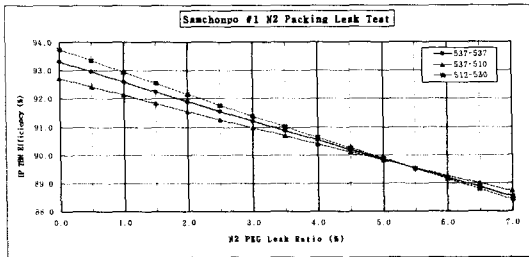


Fig.10 Unit 1. Leak rate before improvement

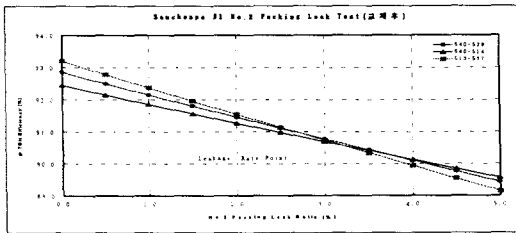


Fig.11 Unit 1. Leak rate after improvement

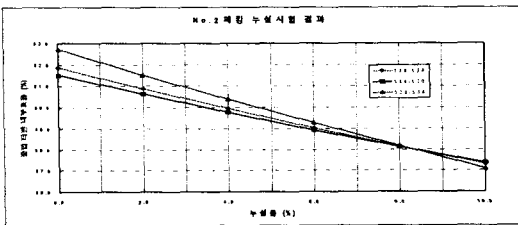


Fig.12 Unit 2. Leak rate before improvement

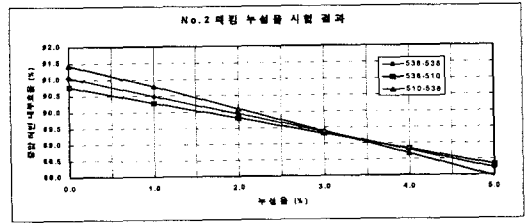


Fig.13 Unit 2. Leak rate after improvement

Table 5 Unit 1. Effect before/after improvement

구 분	설 치 전	설 치 후	전, 후 대비	비 고	
'98년 성능 시험 결과	터빈 효율	44.81	44.89	+ 0.08	동익 및 노즐스케일 제거
	열소비율	1,919.2	1,915.8	- 3.40	
2000년 성능 시험 결과	터빈 효율	44.78	45.20	+ 0.42	패킹교체 후 시험
	열소비율	1,920.5	1,902.7	- 17.78	

(단위: %, kWh)

◇ 가변간극패킹설치 효과 ('98년 대비)

○ 터빈효율 : 0.42 - 0.08 = 0.34 %

○ 열소비율 : 17.78 - 3.40 = 14.38kcal/kWh

가변간극패킹 설치전, 후 1, 2호기 성능진단은 제1호기는 설치전 44.78%에서 설치후 45.20%로 0.42% 효율이 향상되었으며 제2호기는 설치전 44.52%에서 설치후 45.03%로 0.51% 효율이 향상된 결과가 나타났다.

Table 6 Unit 2. Effect before/after improvement

구 분	설 치 전	설 치 후	전, 후 대비	비 고	
'95년 성능 시험 결과	터빈 효율	44.89	44.94	+ 0.05	동익 및 노즐스케일 제거
	열소비율	1,915.8	1,913.7	- 2.10	
'97년 성능 시험 결과	터빈 효율	44.52	45.03	+ 0.51	패킹교체 후 시험
	열소비율	1,931.7	1,909.8	- 21.9	

(단위: %, kWh)

- ◇ 가변간극패킹설치 효과 ('95년 대비)
- 터빈효율 : $0.51 - 0.05 = 0.46 \%$
 - 열소비율 : $21.9 - 2.10 = 19.8 \text{ kcal/kWh}$

4. 결론

고정식 Packing을 가변식 Packing으로 교체함으로써 97,989,390원/월.1기, 4,703,490,720원/년. 4기를 절감할 수 있었다.

후기

본 연구는 주식회사 한국전력 및 두뇌한국 21사업의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 한전전력연구원, 1996, "화력발전소 성능분석지침", pp 237-380.
- (2) 한국전력연구원, 1997, "화력발전소 성능시험지침"
- (3) 한국전력연구원, 2000, "기술지원 보고서"