증기터빈의 가변패킹 형태에 따른 터빈성능 평가에 관한 연구

권영수* ·서정세**

A Study on the Turbine Performance in the steam seal variable clearance packing type of Steam turbine

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), Retractable Packing(가변 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 each packing type

1. 서 론

증기터빈은 고압/중압터빈, 저압터빈(A), 저압터빈(B)로 구성되는데 증기터빈의 축밀봉장치는 증기를 사용하여 케이싱과 축의 간극을 통해 흐르는 증기량을 제한하여 고압터빈에서는 케이싱내에서의 증기누설을, 저압터빈에서는 공기의 유입을 방지하기위한 설비로써 "고정형 패킹"으로 설치되어 있었으나, 고정형의 패킹의 설계간극은 터빈 임계속도시 발생되는 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. 그러므로 삼천포화력 제1,2호기와 보령화력 1,2호기에는 상기와 같은 문제점을 해결하고자 최근 해외에서 개발,사용되고 있는 가변간극형 패킹(Variable Clearance Packing)을 채용하여 개선하였다.

* 한국남동발전(주)
E-mail , kyeunyous@kosep.co.kr
TEL , 02)3456-7234 FAX ,02)3456-7259
* 경상대학교 항공기계공학부
E-mail , jssuh@nongae.gsnu.ac.kr

본 연구에서는 실험 대상인 보령화력 발전소 제1,2호기와 삼천포화력 1,2호기의 고정형과 가변형 증기 패킹의 설치전후 터빈성능시험을 통해 터빈효율을 비교, 검토하여 터빈 효율을 분석, 에너지 효율을 평가하고자 한다.

2. 축밀봉 장치의 문제점 및 개선

2.1 고정형 Packing 특성

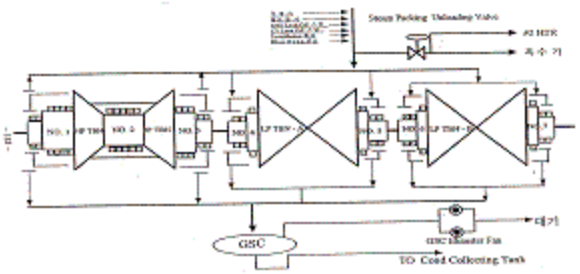
Table 1은 보령화력1,2호기의 설비 규격을 나타내는데, 축밀봉 장치는 [Fig.1]과 같이 터빈축이 케이싱을 관통하는 부분에 설치되어 있고 설치목적은 케이싱과 축의 간격을 통해 흐르는 증기량을 제한하여 케이싱내에서의 증기누설 및 공기의 누입을 방지하는 장치이다. Labyrinth Packing은 터빈측에서 부터 N-1/2/3/4/5/6로 호칭을 하며 특히 ,N-2 Packing은 [Fig. 2]와 같이 HIP 터빈 중앙에 설치되어 고압터빈과 중압터빈사이의 누설증기를 제한하는 기능을 수행하며, [Fig. 3]은 터빈내부에서 N-2 Packing의 축밀봉증기의 흐름을 나타낸다.

Table 1 Facility specification

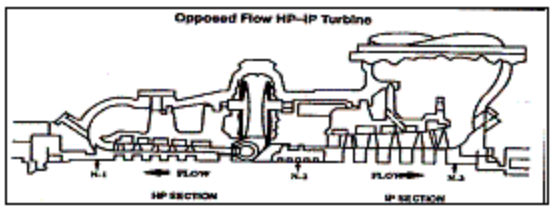
구 분	규 격
형 식	충동터빈, 4류식, 복수,재생재열
정격출력	515,677 kw
회전수	3600 rpm
Steam Condition	◦주증기 압력 : 169 kg/㎠ ◦주증기 온도 : 538 ℃ ◦재열증기 온도 : 538 ℃ ◦복수기 진공도 : 721.9 mmHg ◦터빈단수 (Number of Stage) -고압(HP)터빈 : 6단 -중압(IP)터빈 : 5단 -저압(LP)터빈 : 6단 × 4 Flow
제작사	Toshiba社 (日本)
준공년도	◦ 제1호기 : 1983년 ◦ 제2호기 : 1984년

그 구조는 [Fig. 4]와 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.

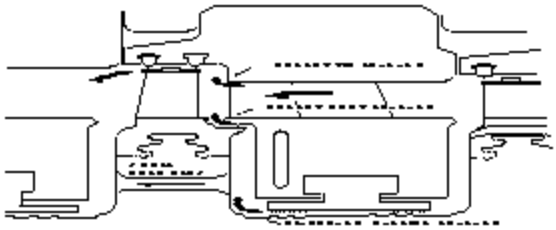
이 패킹은 누설증기에 교축작용을 주는 것이므로 반경방향으로 약간의 틈새를 가진 Teeth를 집중적으로 배치되어 있다.



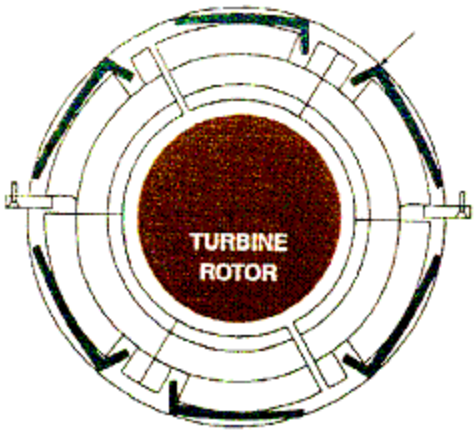
[Fig. 1] Grand seal steam system

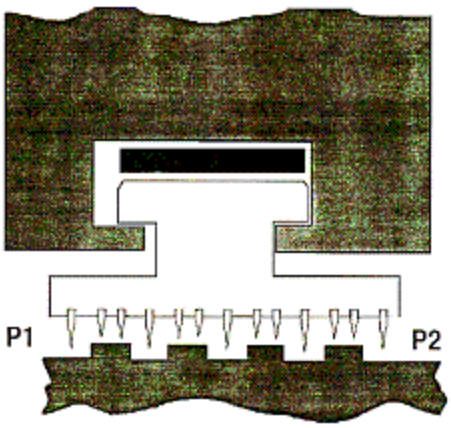


[Fig. 2] N-2 Packing position



[Fig. 3] Seal steam flow of N-2 packing





[Fig. 4] Standard(fixed) packing section

이러한 Teeth는 증기의흐름에 대해 저항이 되어 누설량을 크게 감소시키며 회전부분은 축에 직접 가공된 홈이 있고 정지부분에는 Teeth형의 링 조각(Ring Segment)으로 되어 있다. Ring Segment는 운전온도에 의해 팽창하여도 주위 부분을 완전히 보호할 수 있도록 이음새에 적당한 간극을 두어 가공되었다. 패킹의 Teeth는기계 가공된 홈에 끼워 부하 변동중에 축방향의 접촉이 일어나지 않

도록 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 발생되는 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.

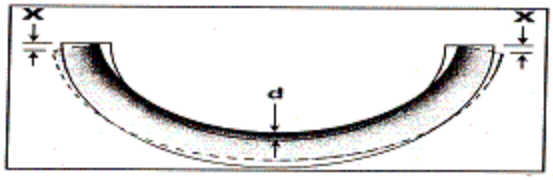
Table 2 Packing ring material

구 분	규 격		비 고
형 식	Steam Seal Labyrinth		
설치수량	7 Sets/Unit		
재 질	저온 (400℃이하)	Bronze합금 (Ni-Bronze)	N4 ~N7 Packing
	고온 (400℃이상)	B50A173 (Cr-Mo강)	N1 ~N3 Packing
Spring재질	Inconel-X 특수합금		Leaf Type

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

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 회전부와 고정부의 접촉에 의한 마찰(Rubbing)을 방지하기 위해서는 기동초기에 Packing Ring의 간극을 크게 하는 것이 좋다.

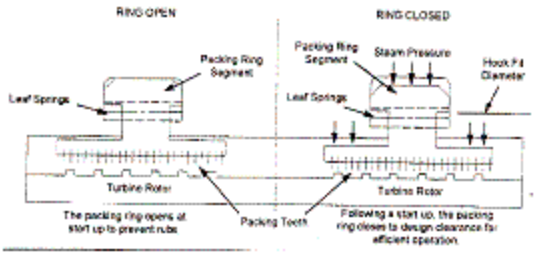


[Fig. 5] Packing ring movement in thermal expansion

2.2 가변형 Packing 특성

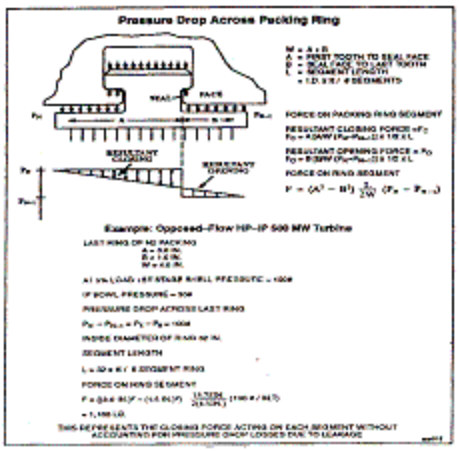
2.2.1 Positive Pressure Variable Clearance Packing

터빈에 사용되는 일반패킹은 Seal 간극이 고정되어 간극이 조절되지 않으나, 가변간극 패킹은 [Fig. 6] [Fig. 7]과 같이 출력 약 25%이하에서는 패킹간극이 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 40여개 터빈에 적용하고 있다.

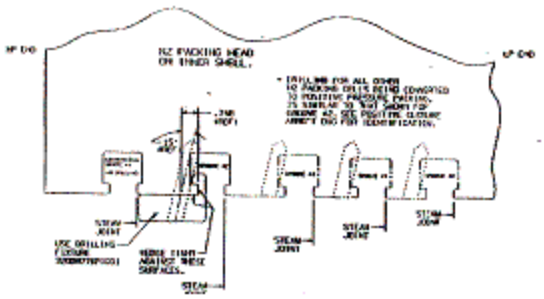


(25%이하부하시 운전) (25%이상부하시 운전)

[Fig. 6] Function diagram of variable packing



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



[Fig. 8] No. 2 packing casing boring diagram

정압가변간극 Packing(Positive Pressure Variable Packing)형태로 일정간극 유지를 위한 장치로서 Leaf Spring을 사용하고 [Fig. 8]과 같이 증기압력 도입을 위해 다이아프램(Diaphragm)에 구멍을 뚫어 개조하였다.

Table 3에는 가변패킹 종류 및 특성을 잘 나타낸다.

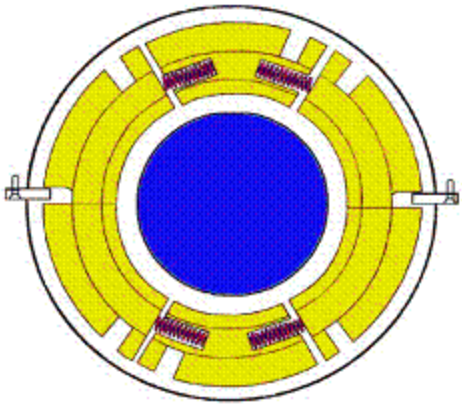
Table 3 Variable packing character

구 분	GE사	Turbocare사
정식 명칭	Positive Pressure Variable Clearance Packing	Brandon Retractable Packing
Spring 종류	Leaf Spring	Coil Spring
원리	기본원리는 동일	
실적(미국)	40여개의 터빈에 적용	550여개 터빈에 적용
PackingBack측 압력도입 방법	Diaphragm에 5/8" 구멍뚫음	Packing 상부측을 가공

그러나 정압가변간극 Packing은 계획예방정비 공사를 위해서 분해시 Ring Segment에 약간의 Rubbing이 발견되어 정확한 작동여부가 불명확한 점이 발견되었다.

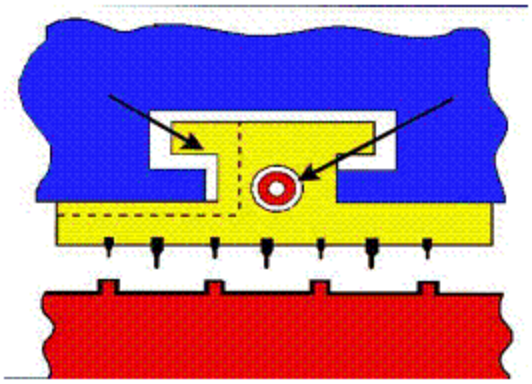
2.2.2 Brandon Retractable Packing

Brandon Retractable Packing은 Positive Pressure Variable Clearance Packing과 비교하여 동작원리는 같으나, 사용 Spring이 Positive Pressure Packing에는 Leaf Spring을 사용하나 Retractable Packing에는 Coil Spring을 설치하고 Packing Backside에 압력도입방법이 Positive Pressure Packing은 Diaphragm에 5/8" 구멍을 뚫으나, Retractable Packing에는 Packing 상부측을 가공, Backside로 압력이 가해지도록 하였다.



[Fig. 9] Retractable packing 단면도

Retractable Packing은 [Fig. 10]에서와 같이 Open위치에서 축과 Packing Ring과의 간극을 3.81mm 유지하다가 Close 위치에서는 0.38~0.63mm 간극을 유지하며, HIP 터빈에 주로 설치된다.

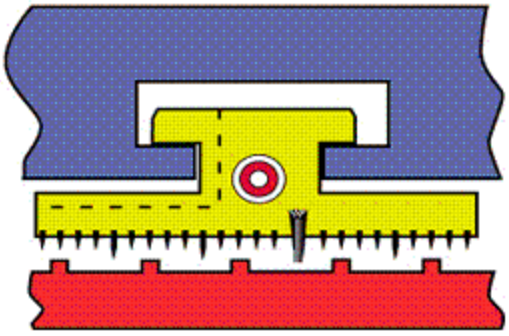


[Fig. 10] Retractable Packing Section

2.2.3 Retractable Brush Seal

Retractable Brush Seal은 Retractable Packing에 설치되어 [Fig. 11]과 같이 기동중에는 Brush Seal과 Rotor와의 간격이 0.51mm로 다소 큰 간극을 유지하다가 25% 이상의 부하에서 운전시 0.051mm로 간극(최대 0mm)으로 유지하여 축

누설증기를 감소시켜서 터빈효율을 증가시키는 역할을 한다.



[Fig.11] Retractable Brush Seal Section

그 성능은 제작사에서는 터빈효율이 1~3% 정도 증가한다고 하며, 미국에서는 70여개 발전소에 설치, 운영중이나, 아직 국내에서는 입증되지 않은 기술이지만 최근 태안화력 3호기 HIP TBN 8단에 설치되어 사용되고 있어 그 실증여부가 주목된다.

3. 실험 결과

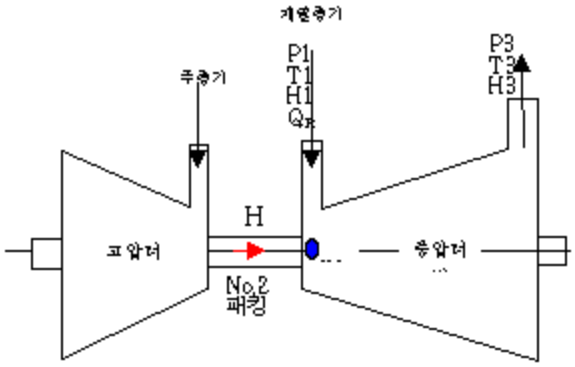
3.1 Positive Pressure Packing

3.1.1 누설량 측정

삼천포1,2호기의 N2 Packing 누설량 시험은 [Fig. 12]과 같이 중압터빈 내부효율변화를 이용한 간접측정 방법으로 한전 전력연구원에서 시행하였다.

시험원리 : 중압터빈 내부효율계산 결과의 오차 변화
- 주증기 온도 ↑, 재열증기 온도 ↓ ⇒ 오차감소
- 주증기 온도 ↓, 재열증기 온도 ↑ ⇒ 오차증가

이 시험은 고압터빈의 증기가 중압터빈으로 누설되는 증기량을 측정하는 목적으로서, [Fig.9]와 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 중압터빈 엔탈피강하로 효율(내부효율)이 누설량의 변화에 따라 어떠한 경향을 띄면서 변화되는가를 그래프상에 plot하여, 3회의 시험결과의 교점이 누설량이 된다는 특성을 이용하였다. Packing 교체 전,후의 누설시험 결과는Fig.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 T1 = 재열기 출구 증기온도
H1 = 재열기 입구증기엔탈피 H3 = 재열기 출구 증기엔탈피
H2 = No.2 Packing 누설증기 엔탈피
QRH = 재열기 입구 증기유량
H_{RB} = 재열기 Bowl에서의 증기 엔탈피

[Fig.12] Measuring diagram of leak steam

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

3.1.2 누설시험 결과

터빈 효율향상을 위한 계획예방 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 스케일 작업 후 성능진단한 제 1 호기는 '98년도 성능 시험치, 제 2호기는 '95년도 성능시험 결과치가 Table 5, 6에 잘 나타나 있다.

Table 5 Unit 1. Effect before/after improvement

구 분		설치전	설치후	전,후	비 고
'98년 성능 결과	터빈효율	44.81	44.89	+0.08	동익 및 노즐스케일 제거
	열소비율	1,919.2	1,915.8	-3.40	
'00년 성능결과	터빈효율	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 %
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		설치전	설치후	전,후	비 고
'95년 성능 시험	터빈효율	44.89	44.94	+ 0.05	동익 및 노즐스케일 제거
	Heatrate	1,915.8	1,913.7	- 2.10	
'97년 성능 시험	터빈효율	44.52	45.03	+ 0.51	패킹교체 후 시험
	Heatrate	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 kcal/kWh

3.2 Retractable Packing

보령화력 1,2호기 터빈의 N1 Packing의 Gr#3~#5, N2 Packing의 Gr#1~#5, N3 Packing의 Gr#1~#3, HP TBN Stage Packing #2~#6, IP TBN Stage Packing #7~#11에 설치하였다.
태안화력1,2호기 터빈의 N1 Packing의 Gr#4,#5, N2 Packing의 Gr#1~#6, N3 Packing의 Gr#1, #2, HP TBN Stage Packing #1~#7, IP TBN Stage Packing #7~#11에 설치하였다.

3.2.1 누설량 측정

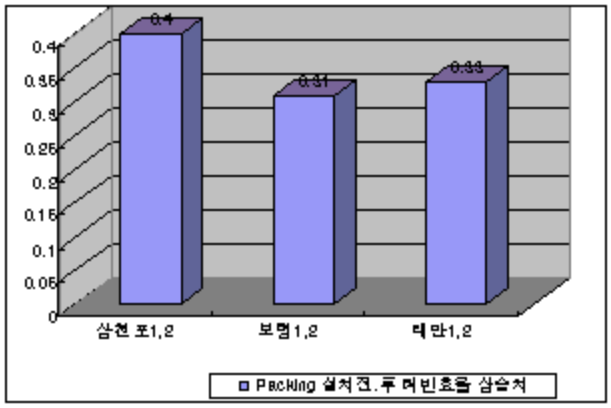
Table 7 N-2 Packing leak quantity(단위:%)

구 분	개조전	개조후	개조대비
보령제1호기	9.7	2.5	-5.2
보령제2호기	8.1	2.83	-5.27

3.2.2 성능시험 결과

구 분		설치전	설치후	전, 후
보령 1호기	터빈효율	44.36	44.80	+ 0.44
	Heatrate	1938.59	1919.79	-18.80
보령 2호기	터빈효율	44.78	45.45	+ 0.67
	Heatrate	1920.5	1907	-13.5

구 분		설치전	설치후	전, 후
태안 1호기	터빈효율	45.33	45.82	+ 0.49
태안 2호기	터빈효율	45.50	45.82	+ 0.33
	N2누설율	4.51%	2.6%	-1.91



[Fig. 13] 발전소별 가변패킹설치전후 효율상승치

4. 결론

고정식 Packing을 가변식 Packing으로 교체함으로 삼천포화력1,2호기는 4,703,490,720원/년, 4기 을 절감할 수 있었으며, 보령화력1,2호기는 년간 2.6억원을 절감, 태안화력1,2호기는 년간 3.8억원을 절감할 수 있었다. 더욱 Retractable Packing에 Brush Seal을 통시에 설치할시 많은 효율상승이 기대된다.

후기

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

참고문헌

(1) 한전전력연구원, 1996, "삼천포1,2호기 성능진단결과 보고서", pp 15-45.
(2) 한국전력연구원, 2000, "기술지원 보고서"
(3) 한국전력연구원, 1998, "보령화력1,2호기 성능진단결과 보고서", pp 23-37.