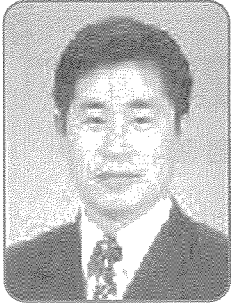


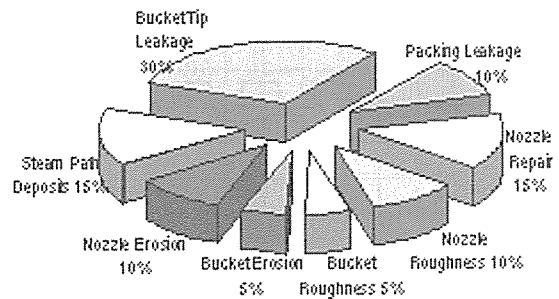
# 증기터빈 노후설비의 성능개선 고찰 (Ⅱ-2)



두산중공업(주)  
증기터빈기본설계팀  
정해석 과장  
Tel:(055) 278-6590

능성

## 4.2 증기터빈의 효율저하 요인



(from GE Schofield, 1997)

## 4. 성능개선 적용 기술

### 4.1 성능개선 방향

#### 가. 초기 조건 검토

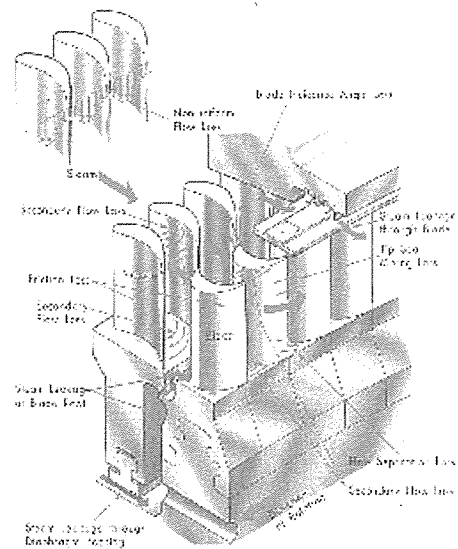
- 열정산서(Heat Balance Sheet)의 터빈 입·출구 증기조건 검토  
☞ 각 Stage의 Condition 검토
- Axial & Radial Clearance 검토  
(초기 설계치, 최근 분해/조립치)
- Bucket Vane & Nozzle Partition Profile 및 보유 자료 검토

#### 나. Steam Path 개선방향 검토

- Advanced Vortex Vane의 적용 가능성 및 범위
- Bucket Dovetail의 변경 가능성 (Stress)
- Bucket Cover의 Grouping 변경 (Integral Cover Type)
- Bucket & Diaphragm의 Stress Analysis

#### 다. Clearance 개선방향 검토

- Axial & Radial Clearance의 변경 가능성
- Root Packing Ring의 Sealing Type 변경 가능성
- Bucket Tip & Root Spill Strip의 Type 변경 가



#### 가. 증기 누설 : 40%

(Leakage Control Damage)

☞ Bucket Tip, Root & Packing의 Leakage Loss

#### 나. 고체입자 및 습분에 의한 침식 : 15%

(Solid Particle & Moisture Erosion)

☞ 고압/중압의 First Stage와 저압의 Last Stage

다. 이물질 부착 : 15%

(Steam Path Deposits)

☞ Steam Flow & Friction Loss

라. 외부물질로 손상 : 30%

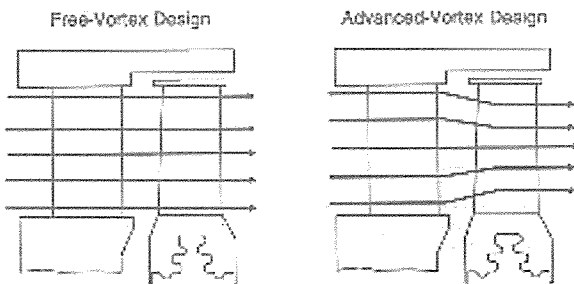
(Steam Path Damage)

☞ Vane Profile의 Damage & Roughness Loss

### 4.3 Advanced Vortex Vane Design

가. AV Vane의 잇점

- Vane Profile 손실(loss)을 최소화  
증기의 유동(Steam Flow)을 가운데로 유도하여 Bucket에서 큰 에너지로 변환시켜 Stage 효율을 상승
- Root부 반동도 증가, Tip부 반동도 감소로 Tip부의 손실 최소화
- 입구의 증기각도(Steam Flow Angle)와 정확한 Profile 설계로 유동을 방해하는 2차 유동손실 감소



나. 회전익(Bucket) Design

Vane Profile 변경	Bucket 형상 변경
■ Bucket 원심력 증가	■ Natural Frequency 변화
■ Dovetail Width 증가	■ Partition 변화
■ Wheel Width 증가	■ Wheel 위치 변화



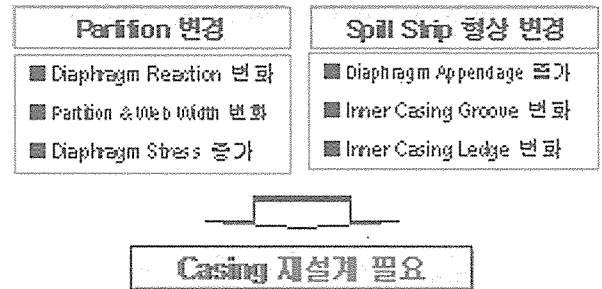
- Vane Profile & Dovetail Size  
Conventional Type보다 Bucket Tip의 단면적이 커짐으로 Bucket의 원심력 증가를 유발하고 증가된 Reaction의 비만큼 압력강하가 Bucket에서

증가됨으로 원심력과 Reaction의 영향으로 Dovetail부위의 미치는 Stress 증가를 고려한 Wheel Width를 반영해 주어야 한다.

- Rotor 재 설계  
Wheel Width가 증가될 경우는 Stage의 Wheel 위치와 Diaphragm Packing 위치 및 크기가 변경됨으로 Rotor는 재설계를 수행하여야 하며, Wheel Width 및 직경의 변경으로 Rotor에 대한 진동 및 동특성 해석 등을 수행하여 이에 만족하는 Rotor 설계가 필요하다.

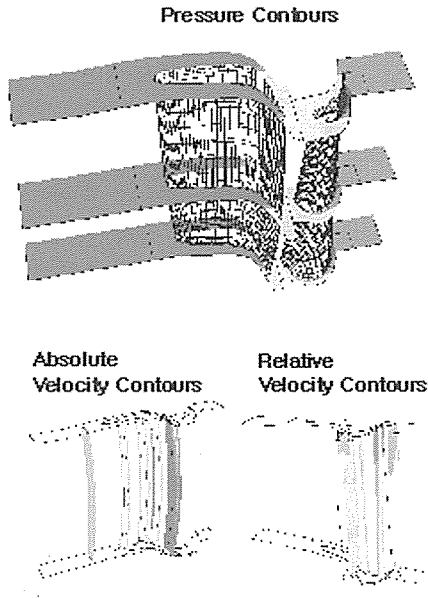
다. 고정익(Diaphragm) Design

- Ring & Web  
Partition 형상을 Conventional에서 AV Type으로 변경할 경우는 Reaction에 따른 영향과 Partition 및 Web Size 변경으로 Ring에 미치는 Stress와 Packing Seal의 변경에 따른 Web Width 증가가 일어나는지와 Diaphragm의 Bending Stress를 검토해야 한다.



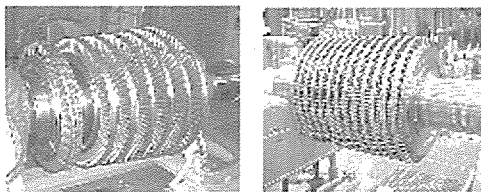
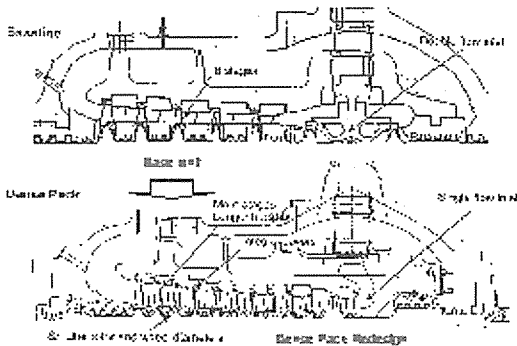
- Tip Sealing  
Bucket Tip 부분의 Sealing을 높이기 위하여 Advanced Type을 적용할 경우는 Sealing 면적이 증가함으로 Diaphragm Appendage에 미치는 영향을 검토해야 한다.
- Casing Groove & Ledge  
Diaphragm Ring의 형상 및 Bucket의 위치변화로 Casing의 Groove 위치 및 형상 변경이 필요하며 Diaphragm Appendage와 Web의 영향으로 발생하는 Stress를 계산하여 이를 견딜 수 있는 Ledge를 재설계해야 한다.

라. Advanced Vortex Design 성능해석



#### 4.4 High Efficiency Stage Design

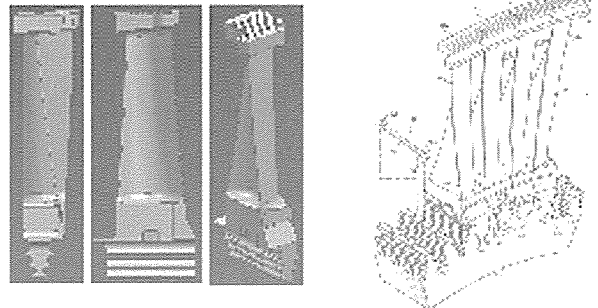
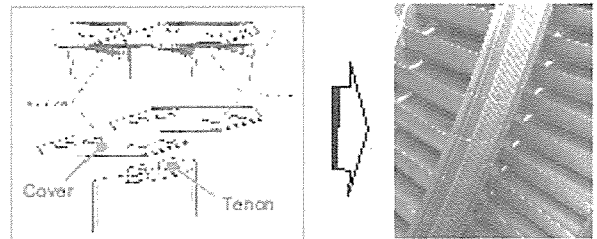
- 가. 양질의 증기조건을 최대한 활용  
(Airfoil 최적화)
- 나. 증기유로의 환형면적(Annulus Area) 증가  
(반동도 증가, Root Dia.감소, Bucket 길이 증가)
- 다. Stage 수 증가로 효율 개선
- 라. 누설증기 최소화



#### 4.5 Integral Covered Bucket

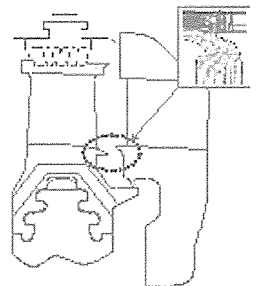
- 가. Bucket Tip부에 Tenon의 안착을 위한 Build-up 삭제로 Bucket Tip부 유로부의 손실이 감소된다.
  - 나. LSB & L-1단에는 Cover Segment가 없으므로 Solid부위가 적어 동일한 Steam Path에서 Active Length를 크게 할 수 있다.
  - 다. 일체형의 Bucket은 내구성과 진동특성이 좋아진다.
  - 라. Tip부에 경사각을 유지하면서 Cover를 수평으로 제작할 수 있으며, Spill Strip을 Cover의 가운데에 위치함으로 Tip부에서 Leakage를 최소화 할 수 있다.
- 또한, 최적의 Steam Flow 형상설계가 가능하므로 유동손실을 줄일 수 있다.

○ Bucket의 조립시간이 단축된다.

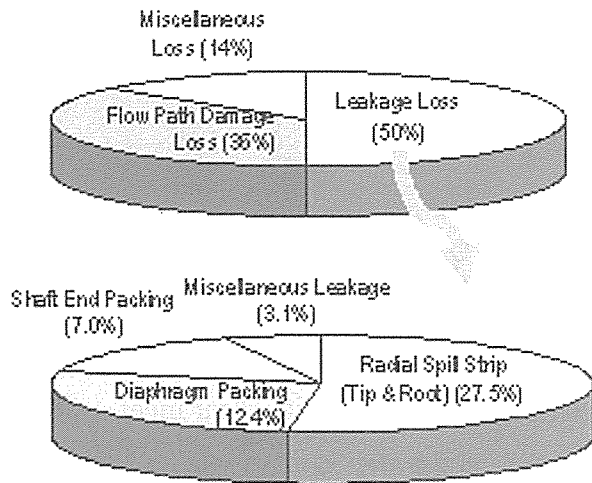


#### 4.5 Large Radius Root Deflector

- Steam Path 로 유입되는 증기의 각도 조절로 주증기 흐름의 방해를 방지하고 증기누설을 최소화
- Bucket Root에서 고정체와 충돌이 발생할 경우 손상을 방지

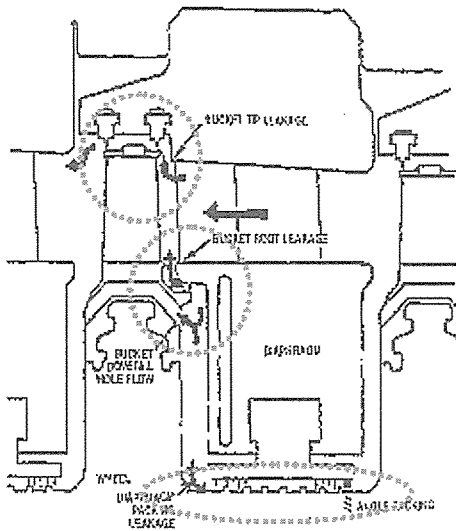


## 4.6 증기누설의 최소화



### 가. Leakage Loss 요인

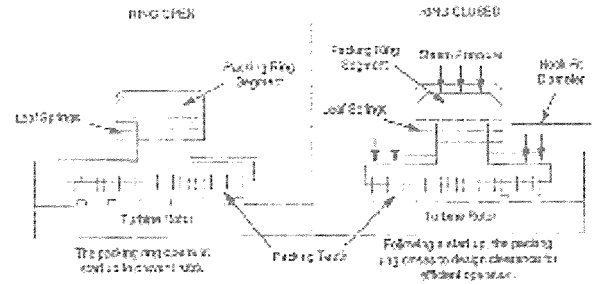
- Leakage Loss  
HP, IP & LP Turbine의 Inter-stage Packing에서 균일하게 발생
- Flow Path Damage Loss  
HP 1st Nozzle(29%) & IP 1st Nozzle(71%)의 손실 발생
- Miscellaneous Loss  
Surface Roughness & Cover Deposit



### 나. 압력가변형 패킹(Positive Pressure Packing Ring)

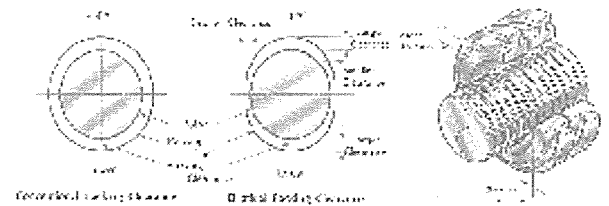
Rotor의 임계속도 통과시 마찰을 줄이기 위한 Type으로 터빈의 기동시에는 Packing 간극을 넓게 하여

Packing Teeth의 손상 가능성을 줄이고 정상 운전에서는 Packing 간극을 좁혀 주어 설계효율 상태를 유지토록 한다.



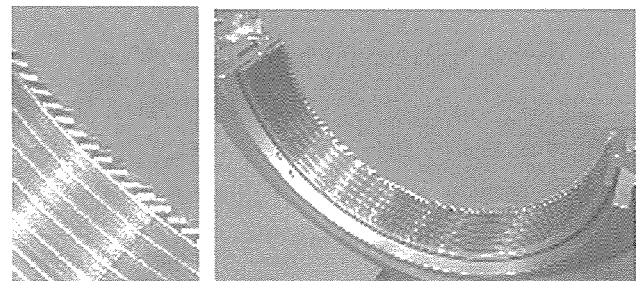
### 나. 타원형 패킹(Elliptical Type Packing)

Rotor의 처짐과 진동을 고려하여 Top & Bottom Clearance를 크게 하고, Left & Right Clearance를 적게 하여 마모(Rubbing)에 따른 Steam Leakage를 최소화 한 것이다.



### 다. Anti-Swirl Packing

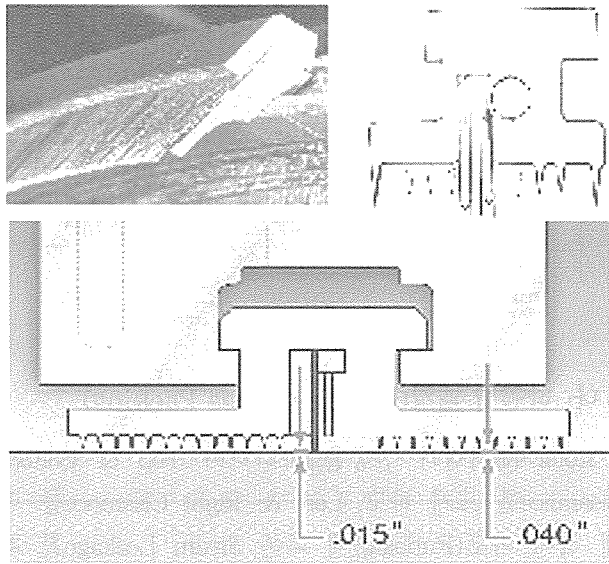
Packing 내부의 증기흐름(Rotational Direction)과 반대방향으로 Seal을 설치하여 운전 중 Packing에서 증기속도를 줄여서 Rotor의 Stability를 향상시킨다.



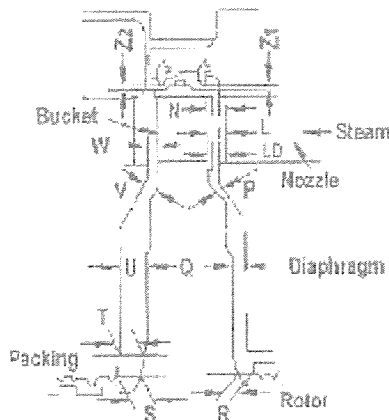
### 라. Brush Seal Packing

Upstream Plate와 Downstream Plate 사이에 Wire를 넣어 기계적으로 결합하여 Sealing하는 것으로 마찰과 마모를 줄이기 위해 Rotor의 회전방향과 일치되게 약 45~60도 정도의 경사진 형태로 Wire를 장착한 것으로 Leakage 효과가 우수하나 Bristle Pack으로 만드는

비용이 고가이므로 Conventional Packing과 병행하여 사용된다.



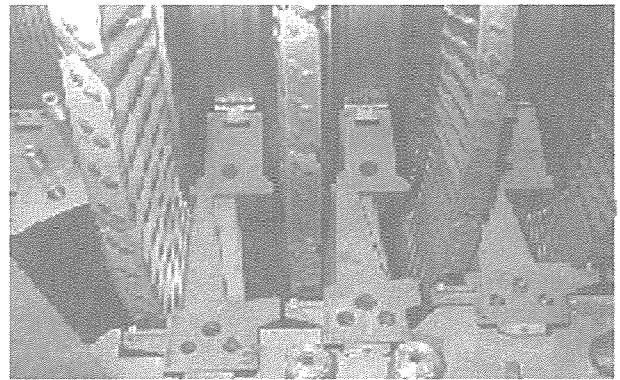
#### 4.7 Wheel Clearance 개선



#### 가. 축방향 간극(Axial Clearance)

고정체의 Anchor Post 및 회전체의 Thrust Bearing의 위치에 변화가 없는 상태에서 근본적인 Clearance의 변화도 미세하지만 주어진 Rotor Movement에서

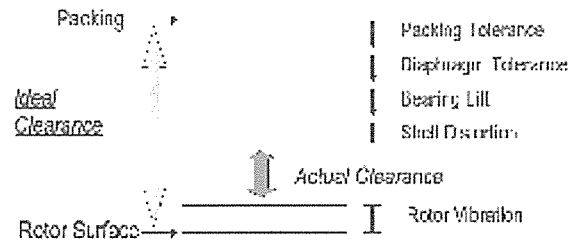
기능품의 특성을 고려하면 부분적인 변경이 가능하다.



#### 나. 반경방향 간극(Radial Clearance)

터빈의 반경방향에 대한 Clearance는 운전조건(회전수, 온도 등)과 직경에 따라 영향을 받기 때문에 효과적인 Sealing을 재검토 하여 변경할 수 있다.

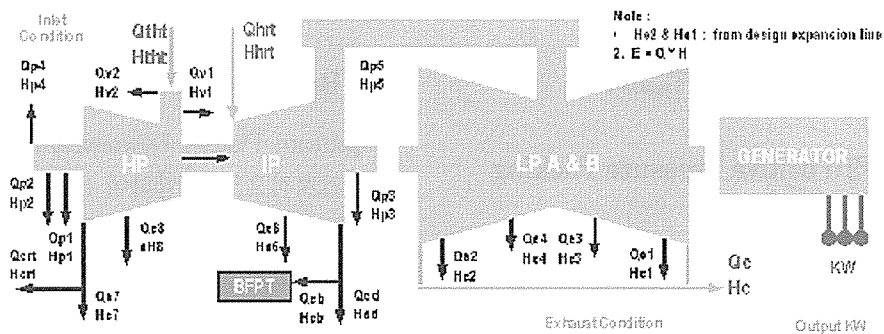
- Thermal Growth 및 Centrifugal Force 재검토
- Sealing Type 및 방법 변경



#### 4.8 터빈의 성능해석

기존설비의 열정산서(Heat Balance Sheet)에 따라 터빈의 입·출구 증기조건으로 최신기술을 국부적으로 탑재하여 성능해석을 실시하고 개선효과를 도출한다.

특히, Steam Path의 전면적인 개선이 요구될 경우는 최적의 Stage 수를 결정하고 Package 교체로 Sealing 및 Stage Loss를 최소화하면 효과적인 성능개선을 기대할 수 있다.



## 5. 성능개선 사례

### 5.1 원형 복원

터빈의 국부적인 손상부를 수명연장 하기 위한 목적이며, 현품의 초기설계 상태를 분석하고 제약조건과 교체일정을 고려하여 원형과 동일한 기능을 유지토록 Retrofit 하는 방법이다.

손상부의 복원을 위해서는 손상원인 및 재발방지를 위한 충분한 설계적 검토가 요구되고 발전소의 보유자료(Material Spec., Dovetail 형상, Vane Profile, Tenon 형상, Bucket 도면, 예비품, ...) 여부가 공급일정에 많은 영향을 미친다.

〈Bucket만 교체할 경우, 발전소에 보유자료가 없다면 현품측정을 통해 복원해야 함으로 상관품과의 Interface에 신뢰도를 확보하기 위해 많은 노력이 필요하다.〉

### 5.2 원형 변경

터빈 손상부 범위와 형태에 따라서는 Interface를 포함한 전반적인 검토를 통해 일정부분 성능향상의 효과를 고려한 원형 변경설계(Modified Engineering)로 수명연장 및 성능개선을 통해 동일이상의 기능을 유지토록 Retrofit하는 방법이다.

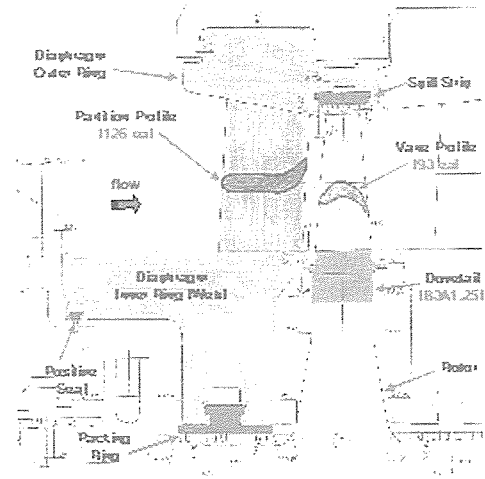
손상부의 원인 및 재발방지를 위한 충분한 설계적 검토가 요구되고 현품의 초기설계상태 및 제약조건과 일정을 고려한 종합적인 성능개선의 효과를 분석하여 최적의 Retrofit 방안 설정이 요구된다.

〈Bucket & Diaphragm을 동시에 교체할 경우, 최신 기술의 향상된 Vane Profile을 탑재하여 성능개선을 할 수 있고 현품의 치수측정도 최소화 할 수 있다.〉

### 5.3 Retrofit 개선사례

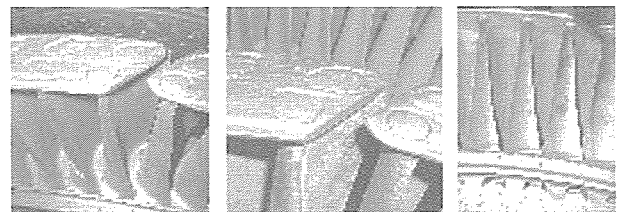
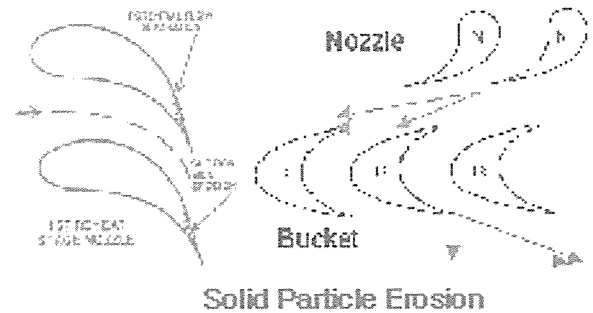
#### 가. 화력500MW 중압터빈 1단 원형변경

- Project 사양 (보령 #1)
  - 출력 : 500MW, TC4F-33.5"LSB
  - Total 35 Stages  
(HP 6, IP 5, LP 6 x 4 flow)
  - 원청공급사(OEM) : Toshiba
  - 상업운전 : #1(1983), #2(1984)



#### ○ 중압터빈 1단 손상

Solid Particle Erosion에 의해 Vane Profile이 손상되어 Steam Flow의 와류현상에 따른 효율저하와 침식이 가속화 될 경우는 Stage의 응력상에도 문제가 됨으로 Vane Profile을 초기상태 이상으로 복원이 요구되었다.

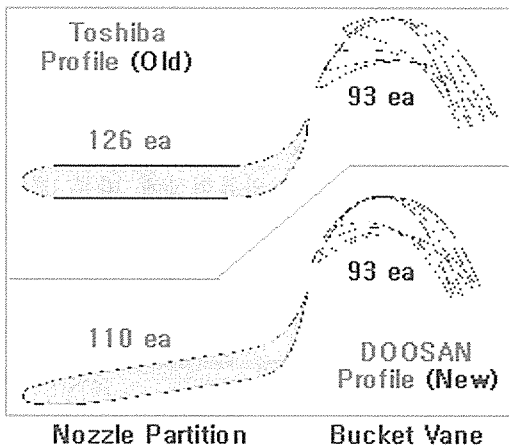


#### ○ Retrofit Engineering 검토

중압1단은 Cooling Flow가 요구되는 특수한 환경이며 AV 적용시 Bucket Tip의 단면적 및 Reaction 증가에 따른 압력강하로 Dovetail에 Stress가 증가됨으로 Rotor의 변경 없이는 AV 적용은 불가하여 Vane Profile을 개량하고 고정익과 회전익의 공진을 피하도록 원형변경 하였다. 입출구의 증기조건을 정확히 알 수 있는 증기시방서(Steam Specification)가 없으므로 정확한 초기의

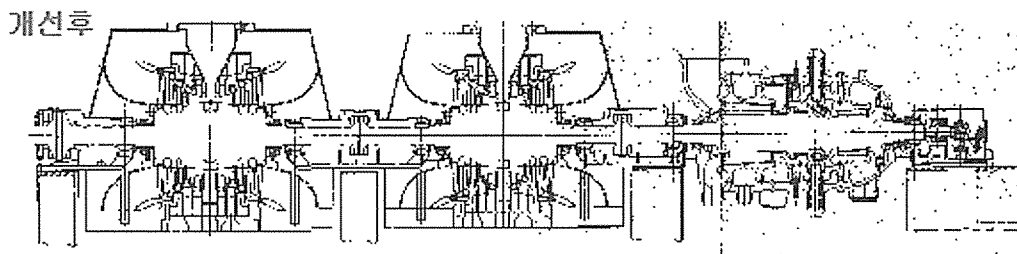
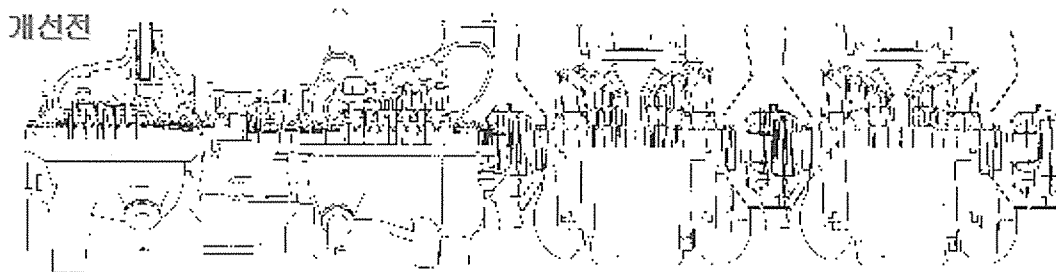
성능을 확인할 수는 없었지만, 1980년초의 Old Design을 Modified하여 탑재한 결과 효율이 102.2%로 향상 되었다.

	공급 가능	수명 연장	성능 개선	비 고
원형복원 적용	○	○	X	현품측정
원형변경 적용	○	○	△	현품측정과 보유자료
Advanced 적용	X	X	○	적용 불가



### a. Vane Profile

주어진 증기조건에서 최적의 효율 및 구조와 진동 문제가 없는 기존의 Dovetail에 적합한 Size로 Vane Profile을 선정(회전의 수량은 불변) 하고 성능 및 Stress Analysis를 통해 Nozzle의 Partition Range를 결



정하였다.

### b. Bucket Cover & Tenon

공진문제와 Stress 계산으로 Cover의 Grouping을 결정하고 Vane의 Tip Profile Section과 Cover를 고려하여 Tenon 형상을 결정하였다.

### c. Bucket & Diaphragm

외곽형상에 대해서는 기존품과 유사하게 적용하였고 기능품에 대해서는 두산중공업(주)의 표준품을 적용하였다.

### 나. 여수화력#1 T/G 성능개선 설계

#### ○ 개선전 사양

- 출력 : 300MW, TC4F-25" LSB
- 구조 : 4 Casing[HP(1)+IP(1)+LP(2)]  
2 LP Rotor 3 Bearing
- 발전기 구조 : Hydrogen/Water Cool Type,  
18.5kV 단자 전압
- 상업 운전 : 1977년 8월 13일

#### ○ 성능개선 후 사양

- 교체 범위 : T/G Complete Set,  
고압 급수 가열기
- 출력 상승 : 320MW
- 터빈 구조 : 3 Casing[HIP(1)+LP(2)], 2 LP  
Rotor 4 Bearing
- 발전기 단자전압 : 20.0 kV

## 6. 결론

발전설비는 환경문제와 발전부지 확보의 어려움으로 대응량의 고효율화가 요구되면서 보다 향상된 기술력을 요구하고 있으며, 초기에 공급된 노후설비는 운전유지비 상승과 신뢰성 운전에 큰 부담을 안고 있으므로 설비의 개량이 요구된다.

노후설비는 전문 Maker의 수명진단과 성능평가를 통한 성능개선 방향을 설정하고 최신기술을 적용한 설비의 개량으로 장기운전에 의한 성능저하의 회복효과와 효율향상 등 성능개선 효과에 따른 발전수익 증

대 및 연료비 절감(수정)에 의한 투자비 회수가 가능하며, 수명연장 및 유지보수비 절감 등의 부수적 효과가 있다

또한, 국가적 측면으로는 신규 전원확보 효과와 발전효율 증가로 인한 에너지절감도 기대할 수 있으므로 국가발전의 기반산업인 발전설비를 효율적이고 안전하게 운영하기 위해서는 전문 Maker의 기술력을 활용하여 성능개선 방향을 충분히 검토하고 수명진단과 성능평가를 통한 노후설비의 개선으로 설비의 효율향상을 물론이고 수명연장으로 안정적인 설비운영이 필요하다.

# 소형 Biogas Cogeneration System

※본 자료는 일본 열병합발전센터 자료에서 발췌·번역한 것임

## 1. 머리말

1990년대에 들어와 지구온난화 등의 지구 규모의 환경문제가 대두됨에 따라 바이오매스발전에 관한 관심이 급속히 고조되었다. 이것은 기후변동에 관한 제3차당사국총회(COP3)에서 이산화탄소를 중심으로 각국의 온실효과가스의 삭감목표가 2010년을 기준으로 구체적으로 설정된 영향이 크다. 예로서 International Energy Agency (IEA) 의 Review에 의하면 영국에서는 Non Fossil Fuel Orders (NFFO) 에 의하여 재생산가능한 자원으로부터 얻는 전력 ("Green Electricity"로 불리운다) 의 일정량 구매가 전력회사에 의무화되고 유사한 움직임이 이태리, 독일 등에서도 나타나고 있다.

덴마크는 "Energy21" 정책에 의하여 재생가능한 에너지의 비율을 2005년에는 12~14%, 2050년에는 35% 까지 확대하는 구체적인 목표가 설정되어 있다. 이와 같은 것을 배경으로 세계각국에서 바이오매스발전이

확대되어 나가고 바이오매스발전을 목적으로한 공장이 가동을 시작하였다.

## 2. 바이오매스발전의 원료와 방식

바이오매스는 직접연소, 가스화 등의 열화학적 변환 및 메탄발효 등의 생물화학적 변환에 의하여 수증기, 가스 등으로 변환되어 발전에 이용된다. 전자는 주로 목재, 볏짚 등의 건조 바이오매스인 반면 후자는 축산폐기물, 생쓰레기,污泥 등의 습윤바이오매스에 사용된다. 발전방식으로는 수증기터빈발전, 가스터빈발전, 가스엔진발전 등이 있다. 소형이며 효율이 높은 연료전지의 이용도 검토되고 있다.

금번 필자가 주목한 메탄발효는 역사적으로 오래된 기술이다. 일본에서는 분뇨나 下水污泥를 대상으로 개발, 실용화되어 왔다. 이것 이외의 유기성폐기물에 관하여는 원료를 고농도의 상태로 처리하는것이 가능하여진 1990년대 후반부터 처리대상물 (분뇨, 정