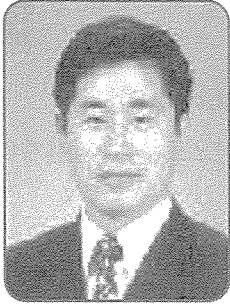


# 중기터빈 노후설비의 성능개선 고찰 (Ⅱ-1)



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

## 1. 서론

국내는 경제개발이 활성화 되던 1970년말 부터 1980년대에 발전설비의 수요가 급증함에 따라 해외 선진 Maker를 통해 다양한 설비가 공급되었다.

국가 기반산업인 전력산업은 넓은 발전부지 확보와 환경문제 등의 많은 비용 때문에 신규건설은 한계가 있으므로 중기터빈의 내구성을 고려할 때, 기존의 노후설비를 개량하여 수명연장 및 효율향상을 통한 안정적인 전력생산을 유지할 필요가 있다.

국가의 중요 전력산업을 기존의 해외 구매선에 의존할 경우, 발전단가 상승과 국내 산업계와 민간에 미치는 과급효과가 매우 큼으로 국내 발전 Maker의 기술력을 활용하여 성능개선 방향을 충분히 검토하고 기본방안을 설정하여 수명진단과 성능평가를 통한 노

후설비의 개선이 요구되며, 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

- 기존설비의 출력증대를 통한 신규전원 확보 효과
- 성능개선을 통한 효율향상으로 에너지절감 효과
- 노후설비의 성능개선으로 전력산업의 기반 구축
- 설비의 안정적인 운용과 신뢰도 향상

## 2. 기존설비의 점검

### 2.1 T/G Outline 구조

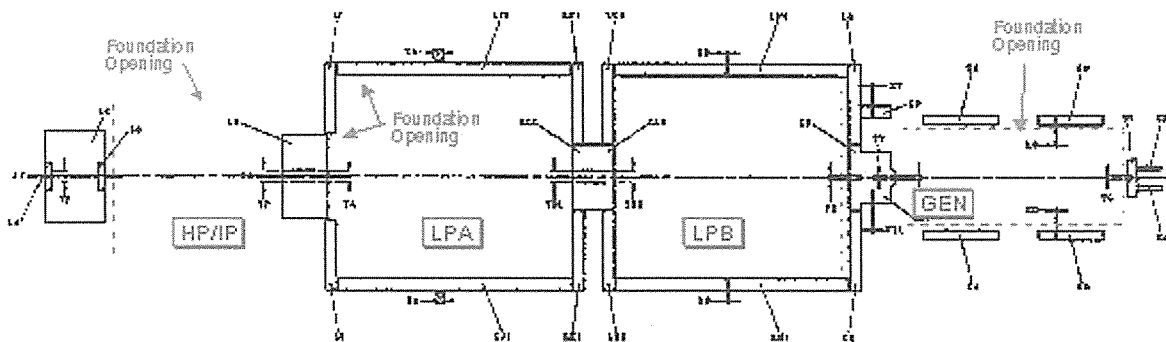
#### 가. Foundation Opening

Casing의 변경 가능성을 검토하기 위해서는 기존설비의 Foundation Opening Size를 점검하여 Maker가 보유하고 있는 New Model로 교체할 경우에 Interface 등을 확인한다.

#### 나. Mechanical Loading

Foundation 각 위치에서 정상(Normal) 및 비정상운전(Emergency Operation)시 Mechanical Loading 값을 점검하여 성능개선의 신제품을 탑재해도 문제가 없는지를 확인한다.

- Normal Operation : Static Load, Vacuum, Torque, Friction



T/G Outline 구조

- Emergency Operation : Loss of Last Stage Bucket, Bowed Rotor, Seismic Forces, Synchronizing Out of Phase

## 2.2 T/G Expansion Diagram

기준설비에서 고정체 및 회전체의 Axial Position을 점검하여 변경 가능성을 검토하고 성능개선시 Axial Movement를 반영하여 설계해야 함으로 Axial Position의 정확한 위치 파악과 운전중 Movement의 이력, 초기설계치 및 분해 점검시 측정된 고정체와 회전체간의 Clearance가 필요하다.

### 가. Anchor Post 위치

저압터빈 중앙부에 위치하고 있는 축방향의 고정체 기준으로 Anchor Post의 위치는 열평창에 의한 Axial Movement 등으로 회전체 및 고정체의 설계조건과 형상에 많은 영향을 미친다. (터빈의 Axial Clearance, Coupling의 Spacer Plate 유무, Casing의 Turnnel 유무 등)



LP Anchor Post

### 나. T/G Control Probe

#### ○ Thrust Bearing Wear Detector(TBWD)

회전체의 Axial Position 또는 Thrust Position이라고도 하며 운전시 회전체의 Axial Movement의 기준이 된다. Rotor의 Thrust Collar를 직접 감지하여 일정범위를 벗어나면 Alarm을 울려주고 위험수위를 넘어서면 자동적으로 Turbine을 Trip시켜 회전체의 안정적인 운전을 유지케 한다.

#### ○ Rotor Expansion Detector(RXD)

회전체의 Axial Position(TBWD)으로부터 회전체의 Expansion량을 감지한다.

#### ○ Shell Expansion Detector(SXD)

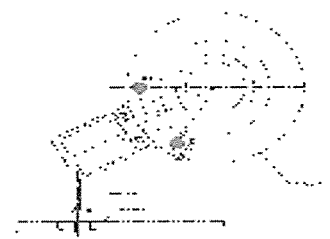
고정체의 Axial Position(Anchor Post)으로부터 고정체의 Expansion량을 감지한다.

#### ○ Differential Expansion Detector(DXD)

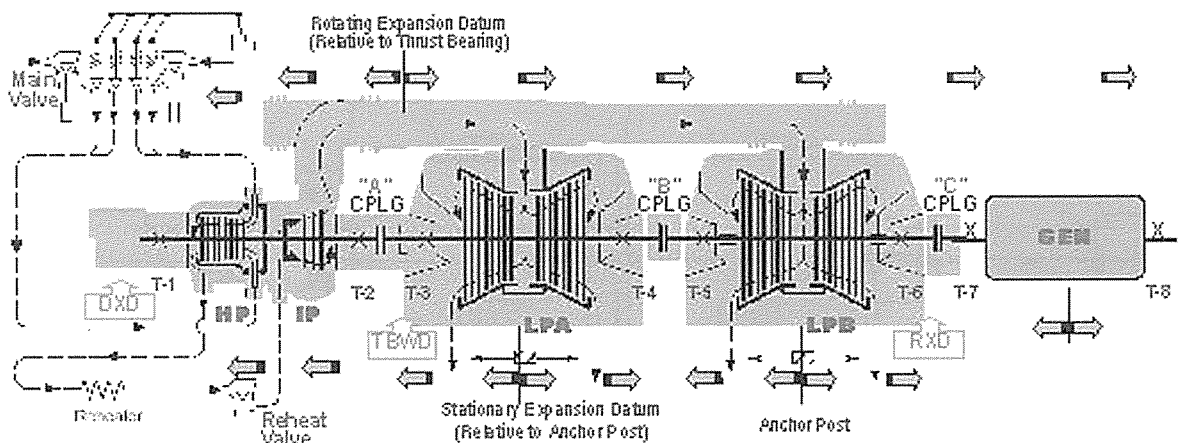
회전체와 고정체의 각 Axial Position으로부터 Expansion량에 대한 차등 평창량을 감지하여 일정범위를 벗어나면 Alarm과 위험수위를 넘어서면 자동적으로 Turbine을 Trip시켜 회전체와 고정체의 Movement에 따른 안정적인 운전을 유지케 한다.



DXD Probe



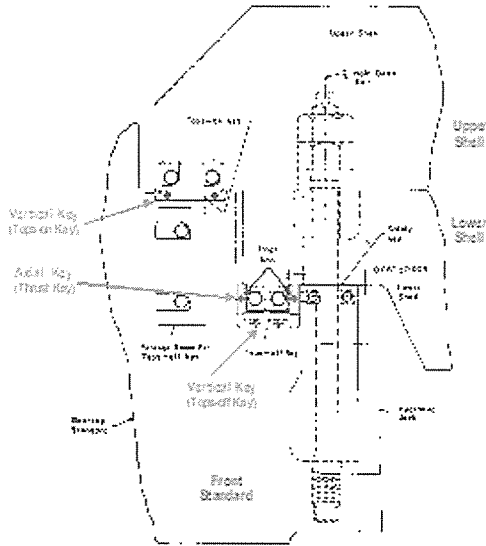
DXD Probe



T/G Expansion Diagram

## 다. HP Shell Expansion

HP Shell은 Front & Middle Standard와 Axial Key로 고정되어 있기 때문에 운전 중에는 LP Anchor Post를 기준으로 Front & Middle의 Foundation Plate 위에서 Sliding (Expansion) 되도록 되어 있다.



### ○ Axial Key

LP의 Anchor Post를 기준으로 Axial Movement 발생에 따른 고정체의 Lower Part를 하나로 구속하고 있는 것으로 Thrust Key라고 한다.

HP Shell과 Front Standard 및 Middle Standard의 축 방향 고정 Key로서 Final Top-off 상태에서 Permanent용으로 최종조정 가공하여 조립한다.

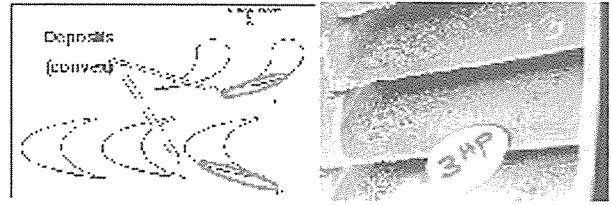
### ○ Vertical Key

Front Standard와 Middle Standard 위에 설치되는 HP Shell의 Vertical 조정을 위한 Key로서 Lower Half 조정시에는 Tops-off Key를 사용하고 HP Section 전체를 조정할 때에는 Tops-on Key를 사용하며 HP Shell의 Alignment에 따라 최종조정 가공하여 조립한다.

## 2.3 손상부 점검 및 분석

### 가. Deposit on Vane Profile

증기통로(Steam Path)의 화학물 부착은 대부분 급수가 원인이며 이물질의 두께와 부착위치 및 표면상태 등에 의해 효율이 저하된다. Vane Profile에 부착된 이물질은 Steam Flow의 변화로 에너지 분포를 다르게 하며, 공기 역학적인 손실과 표면상태에 따른 마찰손실 및 Nozzle과 Bucket의 Throat Area를 감소시킨다.

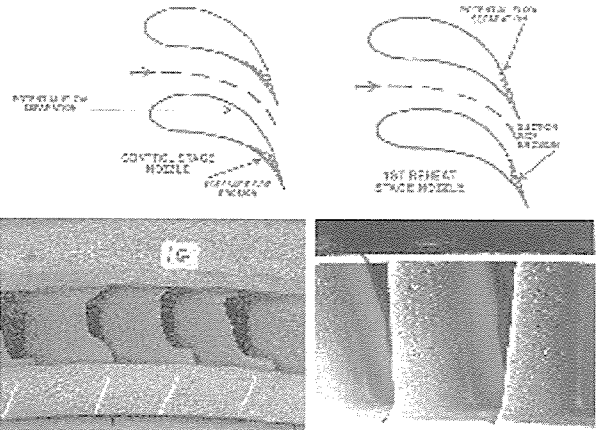


Deposit on Vane Profile

### 나. Solid Particle Erosion

터빈으로 유입되는 증기속에 다량의 불순물 (Solid Particle)이 함유되어 증기유로(Steam Path)부의 부품이 마모되는 것으로 증기유로의 Throat Area 및 Surface Roughness의 증가와 Bucket Tip부의 간극 증가로 효율이 감소한다.

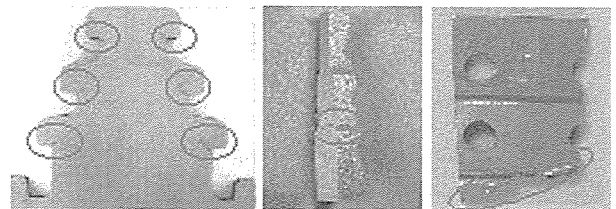
주로 높은 온도와 압력(1000°F 이상, Super Critical)의 증기를 사용하는 보일러의 튜브에서 발생하는 Scale에 영향을 받는데, 화력의 HP-1 & IP-1 Stage에서 민감하게 나타남으로 Profile 표면에 특수한 Coating처리를 하여 보호해 준다.



Solid Particle Erosion

### 다. Stress Corrosion Cracking

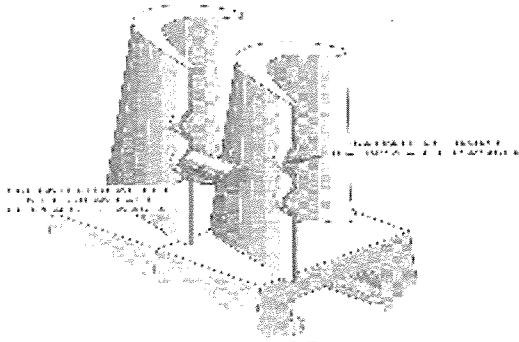
저압터빈의 부식(Corrosion) 환경에서 주로 Rotor Wheel 및 Dovetail부에 발생하는 균열형태이며, 파손부위 분석 및 운전이력을 통해 잔존 수명평가를 실시한다. <Crack의 성장 방향 및 진행속도 등>



Stress Corrosion Cracking

## 라. Mechanical Damage

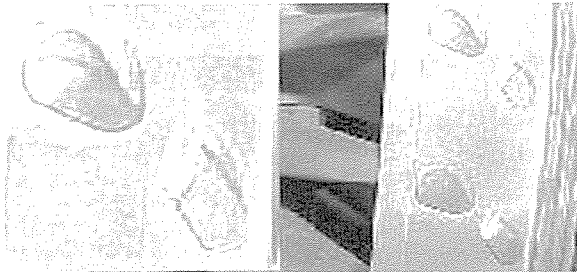
산화 Scale 외의 외부 이물질(Foreign Object)이 증기유로로 유입됨으로써 가해지는 손상으로 증기유로의 면적 변화를 유발하여 효율손실이 발생된다.



Mechanical Damage

## 마. Moisture Erosion

Bucket Tip의 Seal부를 통해 Leakage 되는 Moisture가 함유된 Steam이 고속으로 회전하는 Bucket Cover 및 Tenon과의 마찰로 인해 Erosion이 발생되며, 동일한 조건의 운전이 연속된다면 Moisture에 의한 Tenon부의 Erosion 증가로 Bucket Cover의 이탈로 인해 심각한 문제가 될 수 있다.



Moisture Erosion

## 2.4 수명 및 성능평가

### 가. 수명평가

설비의 손상(균열, 부식 등) 또는 노화현상에 따른 잔존수명을 평가하여 설비의 수명연장 또는 성능개선의 방향을 설정하고 수명예측을 통해 예비품을 적정한 시점에 확보하여 안정적인 운전이 가능케 한다.

### 나. 성능평가

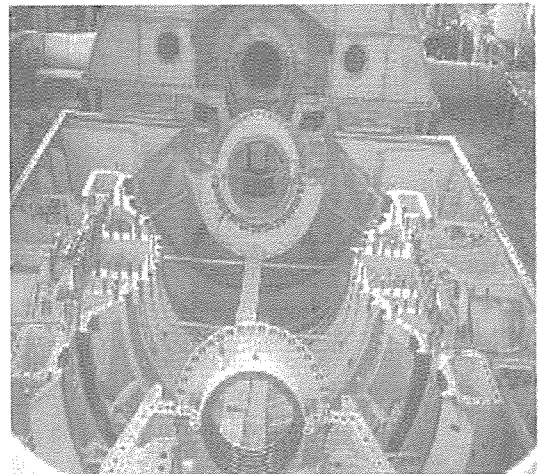
설비의 손상에 따른 성능저하를 평가하고 성능개선의 시점과 최적의 개선방안을 설정하여 효율적인 설비운영을 가능케 한다.

## 2.5 예방정비(Outage) 기간의 점검

### 가. 개선설계를 위한 검증 (for 1' st Outage)

#### ○ 터빈 분해후 고압 및 저압 Casing 점검

- 교체품의 조립부에 대한 형상과 크기 및 Location을 정확히 측정해야 한다. (실제품 도면을 보유하고 있더라도 검증되어야만 맞춤설계를 추진할 수 있다)
- T/G Island에 대한 구조와 Expansion 및 Foundation Loading 분포와 지반 침하 등의 전반적인 기기상태를 파악해야 한다.
- 터빈의 성능개선 외에도 수명연장 및 Maintenance의 편리성 차원에서 교체가 필요한 부위를 점검한다.



#### ○ 성능개선을 위한 개념설계 자료 취득

- 성능개선을 위한 개념설계를 위해 1' st Outage 중에 모든 가능성을 점검 및 검토하고 교체하지 않는 품목과 Interface되는 부위는 현품측정을 통해 치수를 확인한다.
- 기존설비의 성능자료 및 Service Data를 확보하여 검토한다.

### 나. 교체품의 설치/검증 (for 2' nd Outage)

#### ○ 터빈 분해시 점검

- 고압 및 저압 Casing에 대해 Tops-on & Tops-Off Data를 취득한다.
- Casing의 수직 및 수평방향에 대한 변위량 (Tops-on & Off의 Movement)을 확인한다.
- 교체품의 분해후 기본적인 작업을 신속히 마무리 한다.

(Casing의 Horizontal Joint면의 Contact을, 세정, 세척, 청소정리 등)

○ 터빈 설치시 검증

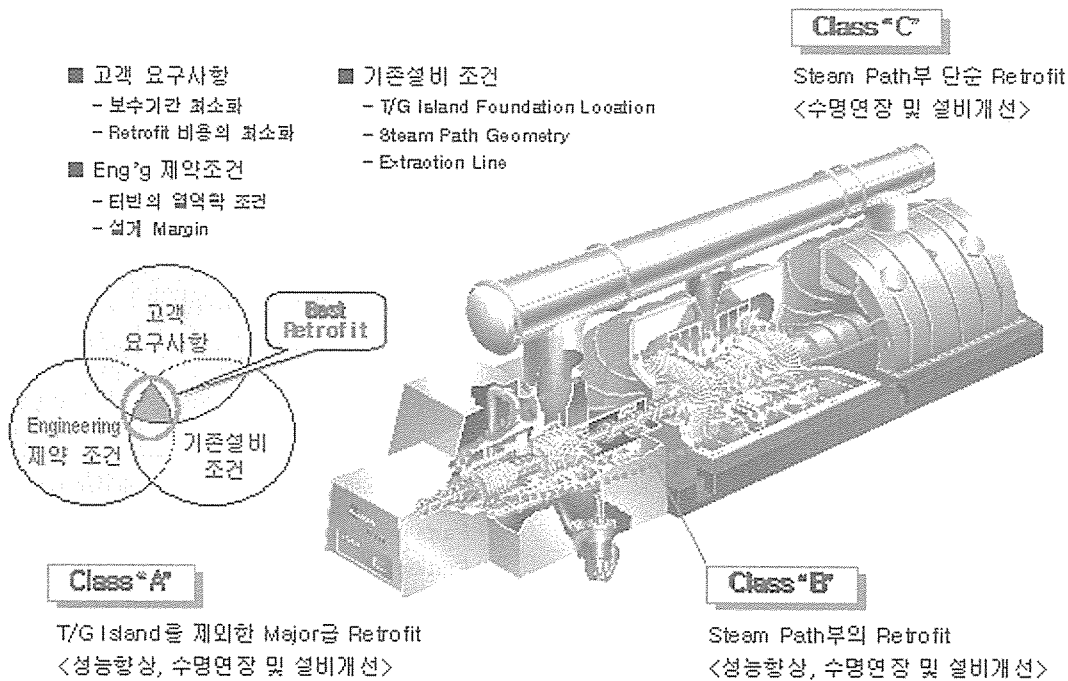
- 준비된 신제품의 Lower Diaphragm은 Casing의 변위량을 반영하여 정렬토록 한다.
- Rotor의 Axial Positioning 및 Axial & Radial Clearance를 취득한다.
- 이후 절차 및 점검은 신규터빈의 설치절차에 준한다.

○ 신제품 기자재 공급시 주의사항

- 2'nd Outage 기간에 신속히 설치하기 위하여 Tooling과 예비품을 최소한 확보하고 Field에서 조정작업이 가능토록 해야 한다.  
(Lifting Hole을 새로운 Size로 적용할 경우나, 설치를 위한 Shim & Key류 등)
- Diaphragm의 Axial Positioning을 위한 조정가공(Steam Joint부)을 최소화가 되도록 설계 및 제작하여 공급해야 한다.

### 3. 성능개선의 특성

#### 3.1 Engineering Class별 특성



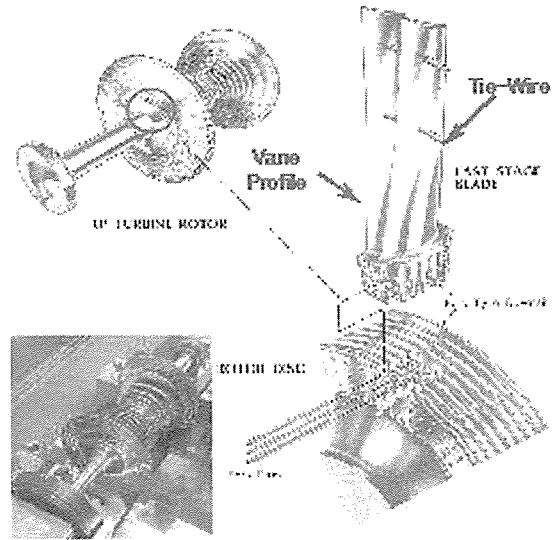
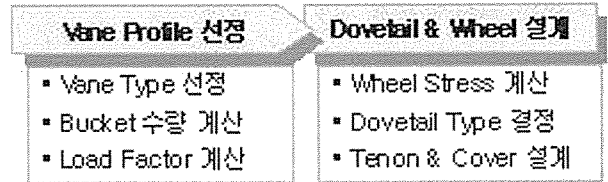
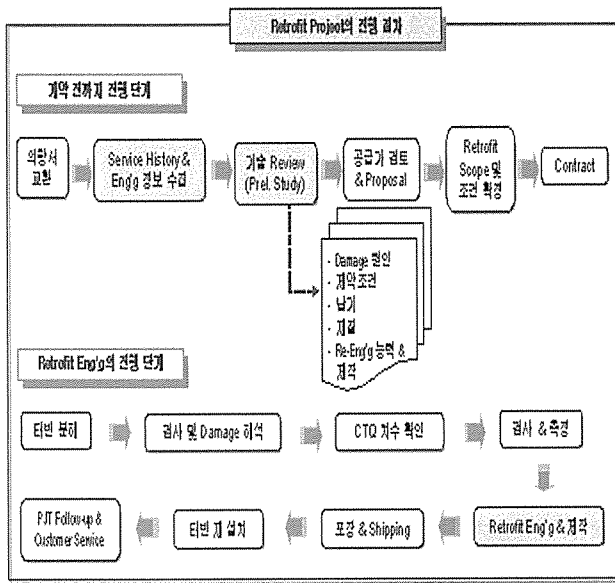
#### 3.2 Steam Path부 Design 개선 단계

- 1960's : Unit Size 증가에 중점
  - Free-vortex stage design
  - HP steam path 효율 : 87 ~ 90%
- 1970's : Reliability and New LSB Design Concepts 에 중점
  - Nozzle and Bucket profiles 개선
  - HP steam path 효율 : 87.5 ~ 90.5%
- 1980's : SPE Design과 가변간극패킹의 적용으로 운전중 성능 유지에 중점
  - Prototype controlled vortex-stage design with improved radial tip clearance controls
  - HP steam path 효율 : 88 ~ 91%
- 1990's : 효율향상에 중점
  - Advanced-vortex Design, Optimized stage design, Integral Cover Buckets
  - HP steam path 효율 : 89 ~ 92%

- 2000's : 효율 향상에 중점(계속)
  - "Dense Pack" design concept
  - More stages, Smaller diameters, Longer buckets, Higher reaction level, etc.
  - HP steam path 효율 : 91 ~ 94%

상과 길이(Vane Profile & Active Length)가 결정되면 운전조건에 적합한 회전체를 설계한다.

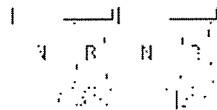
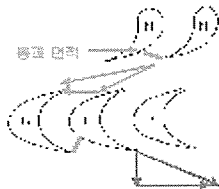
### 3.3 Retrofit Engineering 절차



#### 가. 열역학적설계(Thermo-dynamic Design)

기존설비에서 주어진 증기조건을 이용하여 터빈의 각 Section별로 Stage 수와 Stage Condition을 결정한다.

- 증기의 속도와 각도 계산 (Vane Profile)
- 단별 증기의 조건 계산 (증기의 통과 유량 및 면적)



#### ○ Vane Length 계산

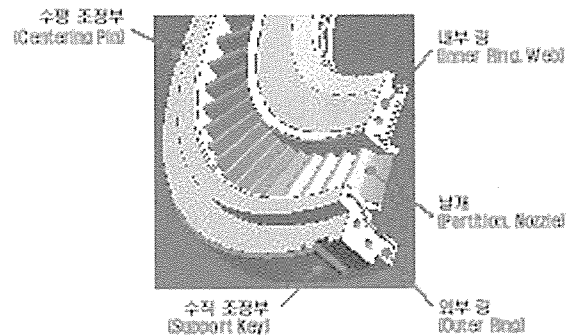
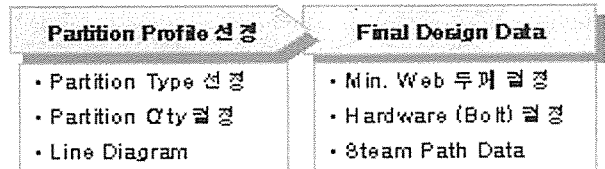


#### 열역학적 설계

- 증기 속도 및 Outline 구성
- 증기 경로 설계(Vane Profile)
- 증기 특성 계산(Stage별)
- Steam Seal System 설계
- Cooling System 설계

#### 다. 고정익 설계 (Diaphragm Design)

증기통로(Steam Path)를 통과하는 고온 고압의 증기 압력차를 고려한 Diaphragm을 설계한다.

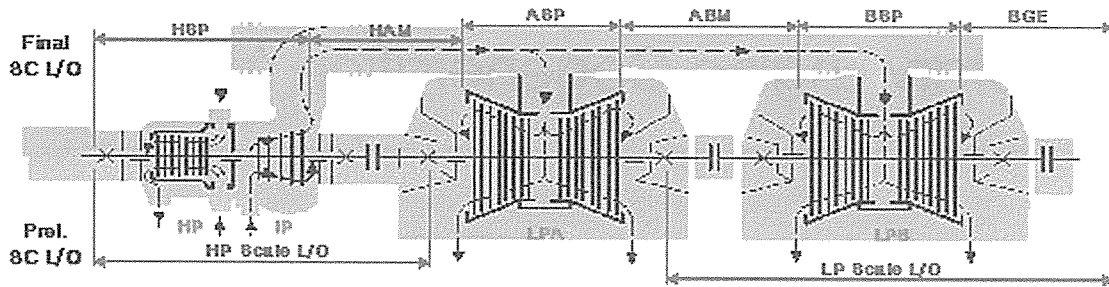


#### 나. 회전체 설계(Bucket & Wheel Design)

열역학적인 설계를 통해 Stage별 회전체의 날개형

#### 라. 실측 Layout 설계(Scale Layout Design)

○ Preliminary Scale Layout



열역학설계 결과물과 각 부품의 설계 Data를 기준으로 실측설계(Scale Layout)를 통해 터빈의 외곽형상 및 기본 치수를 가시화한 Layout 설계를 한다. (구매기간이 긴 Rotor Forging의 형상 확정 가능)

#### ○ Final Scale Layout

Preliminary Scale Layout과 각 부품별 상세 설계 Data가 발행되면 부품간의 Interface를 포함한 상세한 형상과 치수 및 회전체와의 간극 등을 실측설계 한다. (기본설계의 종료를 의미함)

#### ○ 제작도면 작성

완성된 Final Scale Layout과 Final Engineering Data를 기준으로 각 제품의 상세한 제작도면을 작성하며, 각 부품에 대한 상세한 형상과 치수, 재질, 가공법 등을 포함하고 있다.

### 3.4 성능개선의 고려사항

#### 가. Eng'g Information

Retrofit의 원활한 수행을 위해 원청 공급사의 설계 및 제작정보를 확보한다.

〈Heat Balance Sheet, Stage Condition, 설계/제작 관련자료, ...〉

#### 나. Service History

설계자료를 보유하고 있더라도 오랜 운전으로 부품의 변형(Deviation)이 있을 수 있으므로 과거에 Service 이력이 있는 경우, 현품치수와 비교 및 검증이 요구된다.

#### 다. Clearance Review

- Axial & Radial Clearance 설계자료
- 최근 Outage의 분해 및 설치 Data
- 개선 설계시 Clearance의 건전성 검토

#### 라. CTQ Dimension

- 부품의 분해전에 Interface의 주요치수(CTQ : Critical to Quality) 확보
- 성능개선의 Key Item의 치수 및 형상 확보
- Turbine 분해전에 Ass'y Mechanism의 Review

#### 마. Material Selection

- Stage Condition에 적합한 재질특성 파악과 확보 및 미보유시 재질검증(Material Conversion)
- Retrofit 특성인 Short Delivery에 대비하여 Material Stock을 최단기간 내에 우선적으로 확보

#### 바. Spare Parts

- Heavy Damage나 신속한 교체를 위해 필요
- Damage Part와 동일품의 보유시 Lead Time 최소화
- 재질의 성분분석을 위해 필요

### 3.5 성능개선 Focus

현재 운전중인 터빈의 실제품을 측정하고 분석하는 기술과 터빈 진단 결과에 따라 분석된 교체 품목을 설계, 제작하는 기술, 그리고 최종적으로 설치시에 예상되는 Interface를 해결하기 위한 기본기술과 성능평가 기술이 요구된다.

- 기존설비 출력증대 및 고효율화
- 노후설비의 증기유로(Steam Path)부 최신 Model 구축
- 설비의 최유효 사용을 고려한 맞춤설계
- 기존품과 설치기간 최소화 방안 구축
- 개선설비의 성능검증