

# 증기유로 검사에 의한 증기터빈의 성능평가



두산중공업(주)  
 생산부문 기술연구원  
 선임연구원/기술사  
 정용근  
 Tel : (055)278-3694

## 1. 개요

장기간 고온, 고압의 증기조건에서 운전되는 증기터빈은 마모, 부식 그리고 표면거칠기 등이 증가하여 증기유로 손실을 야기함으로써 효율이 저하하게 된다. 이러한 효율저하는 연료소비율을 증가시켜 결과적으로 운전비용의 증가를 가져오게 된다. 그러므로 터빈의 수명에 걸쳐 최적의 성능을 유지하기 위해서는 주기적인 성능시험과 터빈의 Overhaul 기간 동안 증기유로 검사(steam path audit)를 통해 성능저하의 원인을 찾아 대책을 강구해야 할 것이다.

성능시험은 초기 단계의 성능을 평가하기 위한 ASME PTC 6 Acceptance Test와 통상적으로 6개월 간격으로 터빈 Section의 입구와 출구의 온도, 압력만을 측정하여 엔탈피 저하를 측정하는 엔탈피 강하효율 시험(enthalpy drop efficiency test), 성능의 열화가 점진적인지 갑작스러운 것인지의 경향을 알기 위해 핵심 인자들을 모니터링하는 Valve Wide Open 최대 용량시험 등이 있다. 이러한 성능시험으로부터 얻은 데이터의 적절한 해석은 초기 설계조건에 비하여 저하된 효율의 근원적인 원인을 결정할 수 있으며, 조치사항(corrective action)에 대한 계획을 수립함으로써 향후 성능에서의 더 큰 저하를 최소화 시킬 수 있다.

증기유로 검사에 의한 성능평가는 Overhaul 기간 중에 초기 설계조건 데이터와 현재의 증기유로 상

태를 평가하여 성능저하의 주요 원인과 정량적인 평가를 통해 정확한 조치사항을 제시할 수 있으며, 경제성 평가를 통해 향후의 정비 계획을 수립할 수 있다.

본 자료에서는 OVHL 기간 중에 증기유로 검사를 통해 터빈의 성능저하의 주요 요인에 대한 평가방법을 설명하고자 한다.

## 2. 증기유로 손실에 의한 성능저하 평가

증기유로에서 터빈의 성능저하에 영향을 미치는 주요 요인은 Table 1과 같다.

Table 1. 증기유로 손실의 종류 및 주요 요인

손실의 종류	손실의 주요 요인
누설 손실 (Leakage Loss)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tip Spill Strips</li> <li>• Interstage Packing</li> <li>• Shaft End Packing</li> </ul>
유로 손상 (Flow Path Damage)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Other Miscellaneous Leakage</li> <li>• Solid Particle Erosion</li> <li>• Deposits</li> <li>• Mechanical Damage</li> </ul>
기타 손실 (Miscellaneous Loss)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 블레이드에서의 Surface Roughness의 증가</li> <li>• Rotating Blade Cover 아래의 Deposits</li> <li>• 보수로 인한 블레이드의 Trailing Edge Thickness의 증가</li> </ul>

### 2.1 누설(leakage)이 터빈의 효율저하에 미치는 영향

증기터빈의 고정부와 회전부 사이에는 증기의 누설을 막아주는 Packing 또는 Spill Strips가 있다. 이러한 회전부의 Rubbing은 Packing과 Spill Strips의 간극(clearance)을 증가시키는 결과를 가져오고, 그에 따라 증기의 누설을 증가시킬 것이다.

Packing과 Spill Strips의 Rubbing은 로타의 고진동, 고정부의 열팽창, 베어링의 파손 그리고 물 유입 등에 의해 발생될 수 있으며, Solid Particle에 의한 Erosion에 의해서도 발생될 수도 있다.

### 2.1.1 Tip Spill Strip Leakages

Tip Spill Strip (or Bucket Tip) Leakage는 Figure 1에서와 같이 Bucket Tip 위로 증기가 Bypass됨으로써 발생되며, 이러한 간극(clearance)의 증가로 인해 누설 손실이 발생된다.

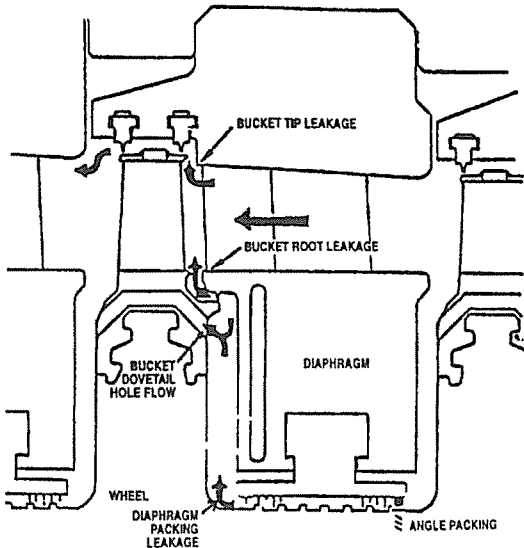


Figure 1. 증동터빈의 Wheel과 Diaphragm의 구조

증기의 누설량은 Stage의 증기조건, Bucket Tip을 가로지르는 압력강하(Stage의 반동도), Axial과 Radial Tip Spill Strips의 간극 그리고 Seal 타입에 의존한다.

Bucket Tip에서의 증기누설에 따른 Stage의 출력손실은 식(1)을 사용하여 계산될 수 있다.

$$\%KW\ Loss = \frac{Leakage\ Flow \times \Delta H_{Downstream}^{Upstream} \times Loss\ Factor}{3412.1 \times KW_{Stage}} \quad (1)$$

여기서  $\Delta H_{Downstream}^{Upstream}$  회전익을 통과할 때의 증기의 엔탈피 변화(BTU/lbm)

Leakage Flow : 누설 유량(lbm/sec)

$KW_{STAGE}$  : Stage가 생산하는 출력(KW)

#### • 누설 유량(leakage flow)

Bucket Tip을 가로지르는 누설유량은 비압축 유량식(flow equation)을 사용하여 계산될 수 있다.

$$w = 3600 C_q A \sqrt{2g \frac{P_1(P_1 - P_2)}{RT_1}} \quad (2)$$

여기서  $C_q$  : Seal Type에 따른 유량 계수(coeffcient)

$T_1$  : Stage의 Upstream 온도(°F)

A : Leakage Area

R : Gas Constant

$P_1$  : Stage의 Upstream 압력(psia)

$P_2$  : Stage의 Downstream 압력(psia)

$C_q$ 는 Seal 타입에 따른 유량계수로서 Figure 2에서 보여주고 있다.

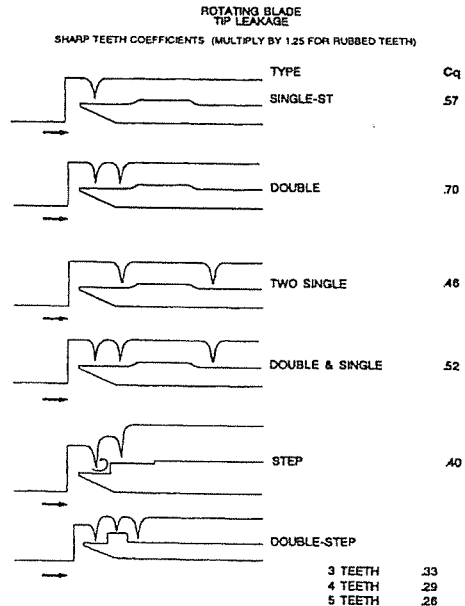


Figure 2. Tip Spill Strips의 Configuration에 따른 유량계수

#### • Loss Factor

Stage에서 누설에 의한 손실이 발생한다면, 다음 Stage에서는 누설된 유량만큼 유용에너지가 증가하게 된다. 누설된 Stage에서의 손실은 다음 Stage에서의 출력 증가로 보상을 받게 되며, 다음 Stage에서의 출력을 보상해 주는 인자를 Loss Factor라고 한다. 그러나 LP터빈의 Last Stage에서 발생한 손실은 다음 Stage가 존재하지 않기 때문에 보상 되지 않는다.

HP, IP 그리고 LP 터빈에서의 Loss Factor를 Figure 3, 4에서 보여주고 있다.

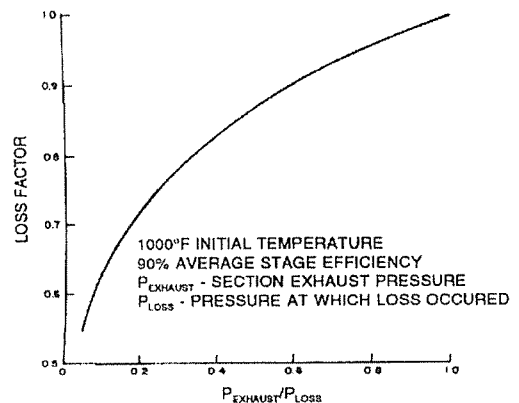


Figure 2. Tip Spill Strips의 Configuration에 따른 유량계수

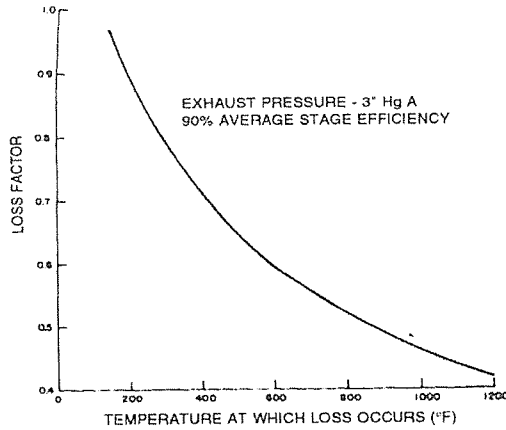


Figure 2. Tip Spill Strips의 Configuration에 따른 유량계수

- Unit Size별 Tip Spill Strips의 간극증가에 따른 출력 손실 평가

Stage 누설손실을 계산하기 위해서는 Stage 반동도 및 압력비의 지식을 필요로 하지만 특정한 설비에서 Stage 반동도 및 압력비 등의 정확한 정보를 얻을 수 없을 때, Table 2와 3에서 보여주는 바와 같이 대략적인 출력손실(KW loss) 데이터가 증동타입의 터빈에 대해 사용될 수 있다.

단위 mil당 출력손실의 값은 각 터빈 Section에서 특정 Stage에 대한 전체 손실이다. 이러한 값들은 각 Section에서 Flow의 수로 나누어져야 한다. 주어진 값들 사이의 터빈 규모에 대해서는 선형관계가 적용될 수 있다. 출력손실들은 Stage의 Loss Factor를 포함하고 있다.

Table 2와 3의 대략적인 출력손실 데이터는 증동타입의 터빈에 관한 것이므로 50% 반동 터빈의 HP Stage에 대해서는 Table 2와 3에서 보여주는 Tip 누설 손실에 1.35로 곱해주면 된다. 이러한 증가는 회전익 Tip 사이의 큰 압력강하로 인한 것이다. IP 터빈과 LP 터빈의 First Stage에 대해서는 1.15를 곱해 주어야 하며, Last LP 블레이드에서는 터빈 제작사에 관계없이 Tip 반동도에서 차이가 없으므로 곱하는 인자는 1이 된다.

Table 2. 화력 증동 터빈에서의 Tip Spill Strips의 과다 간극에 따른 대략적인 출력 손실

Unit Size-MW	KW per mil of Excess Clearance per Stage for Tip Radial Spill Strips		
	HP Stages	IP Stages	LP Stages
100	2.5	1.0	1.5* ~ 0.5**
500	7.0	3.0	6.0* ~ 2.0**

Table 3. 원자력 증동 터빈에서의 Tip Spill Strips의 과다 간극에 따른 대략적인 출력 손실

Unit Size-MW	KW per mil of Excess Clearance per Stage for Tip Radial Spill Strips	
	Double Flow HP Turbines	LP Turbines
800MW(4F LP)	4.0/Flow	3.5* to 1.0**/Flow
1200MW(6F LP)	4.0/Flow	3.5* to 1.0**/Flow

Note \* LP 터빈의 First Stage에 대한 KW 손실  
 \*\* LP 터빈의 Last Stage에 대한 KW 손실  
 First Stage 또는 Last Stage 사이의 Stage 들에 대해서는 선형 내삽법(linear interpolation)을 적용

### 2.1.2 Interstage Packing Leakages

Interstage Packing Leakage는 Figure 1에서 보여주는 바와 같이 Diaphragm 또는 Stationary Blade와 로타 사이의 누설에 의해 증기가 Stationary Blade를 Bypass하는 것을 말한다. 이러한 누설을 감소시키기 위해 일반적으로 Labyrinth Packing이 설치되어 진다.

증기의 누설량은 Stage의 증기조건, Bucket Tip을 가로지르는 압력강하(Stage의 반동도), Axial과 Radial Tip Spill Strips의 간극 그리고 Seal 타입에 의존한다. 그러므로 동일한 누설면적이라면, 큰 체적유량을 가진 Stage가 손실이 적을 것이다.

Interstage Packing에서의 증기누설에 따른 Stage의 출력손실은 일반적으로 식(4)를 사용하여 계산할 수 있다.

$$\%KW Loss = \frac{Leakage Flow \times \Delta H_{Downstream}^{Upstream}}{3412.1 \times KW_{Stage}} \quad (4)$$

여기서  $\Delta H_{Downstream}^{Upstream}$  : 고정익을 통과할 때의 증기의 엔탈피 변화(BTU/lbm)

Leakage Flow : 누설 유량(lbm/sec)

$KW_{STAGE}$  : Stage에서 생산되는 출력(KW)

- 누설 유량(leakage flow)

Interstage Packing을 가로지르는 누설유량은 Martin's Formula를 사용하여 계산될 수 있다.

$$W_{LEAKAGE} = 25KA \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2}{N - \log_e \left(\frac{P_2}{P_1}\right)}} \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} \quad (5)$$

여기서  $W_{LEAKAGE}$  : 누설 유량(lbm/hr)

$P_1$  : Stage의 Upstream 압력(psia)

$K$  : Seal Type에 따른 유량 계수(coeffcient)

- $P_2$  : Stage의 Downstream 압력(psia)
- $A$  : Leakage Area( $\pi D \times C$ )
- $V_1$  : Upstream의 비체적(cu ft/lbm)
- $D$  : 축의 직경(in)
- $N$  : Active Teeth의 수
- $C$  : 간극(in)

K는 Seal Type에 따른 유량계수로서 Figure 5에서 보여주고 있다.

HiLo Packing은 다른 3 타입의 Packing보다 2배의 효과가 있다(유량계수가 다른 Type의 1/2). 즉 HiLo Packing을 따라 누설되는 유량이 Slant-Slant, Slant-Smooth와 Straight-Smooth Packing보다 약 1/2의 누설 유량이 된다는 의미이다. 그렇지만 로타의 축이동시킬 수 있기 때문에 때때로 Teeth의 수를 제한한다. 이때는 Slant-Slant Packing을 사용하는 것이 더 효과적이지만, 로타에 큰 응력 집중을 일으킬 수 있기 때문에 Slant-Slant Packing은 대형 증기 터빈에서는 사용되고 있지 않다.

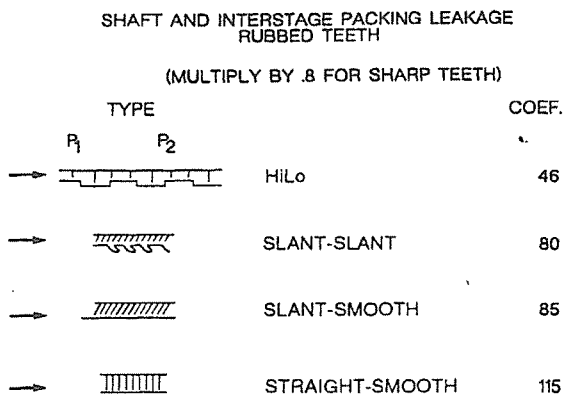


Figure 5.

### Interstage Packing의 Configuration에 따른 유량계수

누설로 인한 Stage 효율 손실 퍼센트는 증기 유로 유량의 백분율로 표현되는 누설량에 의존한다. Double Flow 터빈은 Single Flow로 설계된 터빈보다 약 2배의 누설손실을 가진다. Double Flow의 증기 유로 유량은 Single Flow 유량의 1/2이지만 누설유량은 거의 같으므로 효율손실 퍼센트는 거의 2배이다.

#### • Unit Size별 Interstage Packing의 간극의 증가에 따른 출력 손실 평가

Stage의 Interstage Packing 누설손실을 계산하기 위해서는 Tip Spill Strips 누설과 마찬가지로 Stage 반동

도와 압력비의 지식을 필요로 하지만, 특정한 설비에서 Stage 반동도와 압력비의 정확한 정보를 얻을 수 없을 때, Table 4와 5에서 보여주는 바와 같이 대략적인 출력손실(KW loss) 데이터가 증동타입의 터빈에 대해 사용될 수 있다.

50% 반동 터빈 Stage의 Interstage Packing 누설손실은 증동 터빈 보다 과다 간극(excess clearance)의 단위 mil 당 15% 더 크다. 이러한 누설손실은 HP와 IP 터빈 내의 모든 Stage에 대해 거의 같다. Last LP 블레이드에서는 터빈 제작사에 관계없이 Tip 반동도에서 차이는 없으므로 곱하는 인자는 1이 된다.

Table 4. 화력 증동터빈의 Interstage Packing의 과다 간극에 따른 대략적인 출력 손실

Unit Size-MW	KW per mil of Excess Clearance per Stage for Tip Radial Spill Strips		
	HP Stages	IP Stages	LP Stages
100	4.0	1.0	2.0* ~ 0.5**
500	8.0	2.0	4.0* ~ 1.0**

Table 5. 원자력 증동터빈의 Interstage Packing의 과다 간극에 따른 대략적인 출력 손실

Unit Size-MW	KW per mil of Excess Clearance per Stage for Tip Radial Spill Strips	
	Double Flow HP Turbines	LP Turbines
800MW(4F LP)	5.0/Flow	3.0* to 0.5**/Flow
1200MW(6F LP)	5.0/Flow	3.0* to 0.5**/Flow

Note \* LP 터빈의 Second Stage에 대한 KW 손실

\*\* LP 터빈의 Last Stage에 대한 KW 손실

Second Stage 또는 Last Stage 사이의 Stage 들에 대해서는 선형 내삽법(linear interpolation)을 적용

### 2.1.3 Shaft End Packing Leakages

Shaft End Packing은 터빈 Casing과 로타 사이에 발생하는 누설을 말하며, 누설되는 증기는 Interstage Packing 누설과 달리 Orifice 또는 Forward-Reverse Pitot-Tube로 측정이 가능하다. HP와 IP 터빈에서 Shaft End Packing 사이의 압력 차는 크므로 누설 손실을 최소화하기 위해 가능한 가장 높은 압력에서 사이클로 되돌아 간다. 그러나 LP 터빈 End Packing은 외부 공기가 Exhaust 증기로 들어가지 못하게 막고 발전소로 증기가 빠져나가는 것을 막는 역할을 하므로 LP End Packing에 걸친 압력 강하는 작고 손실 또한 작다.

교축유량의 %로서 나타내어지는 누설유량이 열소

비율에 미치는 영향은 Figure 5~8의 곡선들로부터 얻어진다. HL은 누설 증기의 엔탈피이고, HEXT는 누설이 되돌려지는 Stage의 엔탈피이다. 이 곡선들은 8500 BTU/KWh의 열소비율을 갖는 사이클에 대한 것이므로 8500 BTU/KWh가 아닌 특정 열소비율을 갖는 사이클에 대해서는 실제 열소비율을 식(6)에 대입함으로써 얻어진 수치를 열소비율에서의 % 손실 값에 곱하여 보정한다.

$$\text{Heat Rate Loss\%} = 0.67 \left[ \frac{\text{Actual Heat Rate}}{3412.1} - 1 \right] \quad (6)$$

열소비율 손실%가 아닌 KW Loss%로서 계산하려면 식(7)을 적용하면 된다.

$$\text{KW Loss\%} = \frac{\Delta H.R}{K \times (100 + \Delta H.R)} \times 100 \quad (7)$$

여기서 : K = 0.58 (재열기 이전의 누설일 경우)

K = 1.0 (그 외의 누설일 경우)

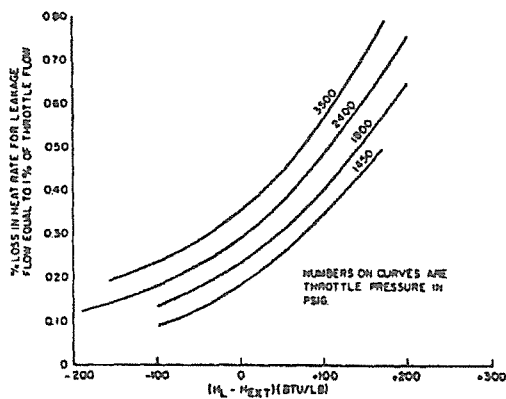


Figure 6. HP Turbine Exhaust의 Shaft End Packing에서 교축유량 1%에 대한 열소비율 손실%

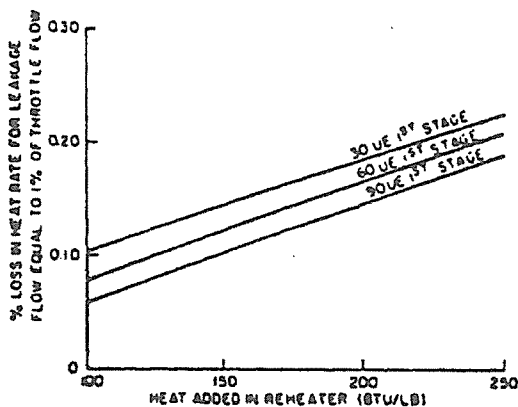


Figure 7. HP Turbine Inlet의 Shaft End Packing (Opposed)에서 교축유량 1%에 대한 열소비율 손실%

Figure 6은 보통 N-1 Packing이라 불리는 HP 터빈 Exhaust End로부터의 Shaft End Packing에 대한 것이다. HP 터빈 Inlet End로부터의 Shaft End 누설은 Opposed Flow 설계에 대해서는 Figure 7을 사용하고, Separate Span 설비에 대해서는 Figure 8을 사용한다. Figure 9는 IP 터빈 Shaft End Packing에 관한 것이다.

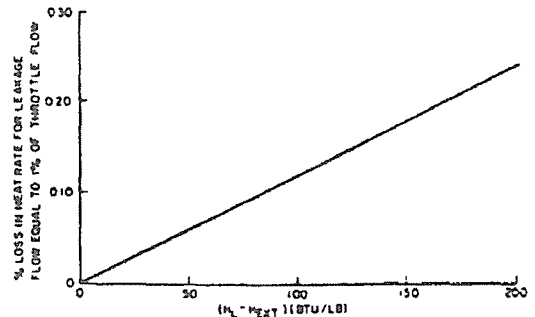


Figure 8. HP Turbine Inlet의 Shaft End Packing (Separate Span)에서 교축유량 1%에 대한 열소비율 손실%

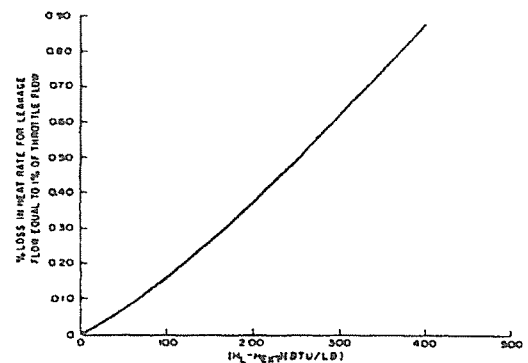


Figure 9. IP Turbine의 Shaft End Packing에서 교축유량 1%에 대한 열소비율 손실%

#### • 누설 유량의 계산

Shaft End Packing의 누설유량을 계산하기 위해서는 Interstage Packing의 누설유량을 계산하는 데 사용된 Martin's Formula(식8)가 사용된다. 이 누설 유량은 설계 간극의 누설유량과 비교된다.

#### 2.1.4 Bucket Root Leakages

Bucket Root Spill Strips는 Figure 1에서 보여주는 바와 같이 Interstage Packing에서 누설된 증기가 Bucket의 증기유로로 유입되는 것을 막아주는 것으로서 Bucket Root 누설은 이러한 Root Spill Strips를 통과하는 누설을 말한다.

Balance Hole은 Bucket Root 누설의 손실을 최소화시키는 중요한 인자이다. 만일 Wheel Hole이 없다면,

Interstage Packing으로 누설된 증기가 증기유로로 유입되어 Main 유량의 유동을 방해할 것이기 때문이다.

Balance Hole은 정상적인 조건하에서는 증기유로로 유입되는 Interstage Packing 누설증기가 없도록 설계되지만, Interstage Packing의 간극이 커져 과다한 유량이 유입된다면, Wheel Hole은 증가된 누설증기를 통과시킬 수 없게 된다. 그러므로 Interstage Packing을 통과한 과다한 증기는 Bucket Root를 통해 증기유로로 유입되게 된다.

실험결과에 의하면 증기유로로 들어가는 Bucket Root에서의 누설유량이 Main Steam의 1%와 동일한 누설유량일 경우 1%의 Stage 효율손실의 결과를 보여주었다.

Figure 10에서는 반동 Drum 로타의 구조를 보여주고 있는데, 반동 터빈에서는 Rotating Blade 사이의 높은 압력강하로 인해 Balance Hole을 설치하지 않는다. 그러므로 정상적인 운전조건에서도 상당한 양의 누설증기가 Bucket Root를 가로질러 증기유로로 유입되므로 Bucket Root의 누설은 터빈의 성능평가지 반드시 고려되어야 한다.

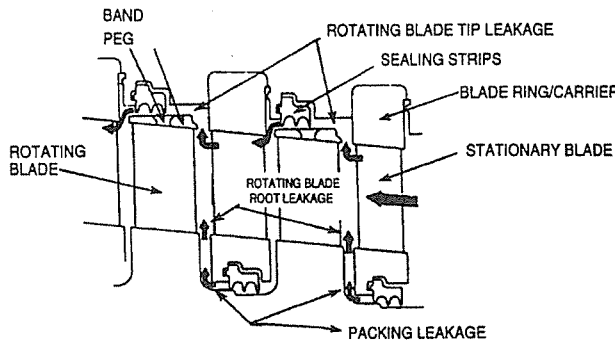


Figure 10. 반동 Drum 로타의 구조

### 2.1.5 Miscellaneous Leakages

터빈의 성능평가를 위해서는 검사되어야 할 또 다른 가능성 있는 누설영역이 있다. Diaphragm의 변형은 아래쪽 Seal Strips의 Rubbing과 Horizontal Joints의 Outer Fit에 이물질의 유입 및 깨짐을 야기함으로써 누설을 야기한다.

이러한 누설은 특징적인 패턴을 남기고, 변형의 모드를 결정하는데 도움을 준다. 또한, Outer Shell로부터 Inner Shell을 통과하는 열전대, Pressure Taps, Cooling 또는 Heating Pipe 그리고 그 외의 장치들이 누설이 발생될 수 있는 부위이므로 반드시 검사되어

야 한다. 예를 들면, First-stage Pressure Tap이 부적절하게 설치되었거나 빠져 있다면 Hole을 통한 증기의 누설 때문에 1,000KW의 출력손실이 일어날 수 있다.

### 2.2 Solid Particle Erosion이 터빈의 효율에 미치는 영향

Solid Particle Erosion(이하 SPE)은 증기에 의해 설비 내로 유입된 이물질(foreign material)에 의해 터빈이 마모되는 것을 말한다. Nozzle, Bucket 그리고 다른 증기유로와 관련된 부품의 표면에서의 열화(deterioration)는 그 정도는 다르지만 거의 모든 터빈에서 발견되어 왔다. 이러한 문제는 열효율이 저하되기 때문에 운전비용을 증가시키고 추가적인 유지/보수 비용을 발생시킨다.

금속 산화물의 박리현상은 증기에 의해 운반된 Solid Particle의 주요 근원이다. 그것은 주증기관, 재열기관, 과열기 및 재열기 튜브 등에 일정한 기간 동안 쌓이고, 열천이(thermal transient)에 의해 부서지므로 어디서 또는 어느 정도로 SPE가 일어나는 지를 예측하는 것은 매우 어렵다. SPE는 고온의 증기가 유입되는 곳에서 가장 심한데 특히, Partial Arc 운전동안 First-stage Nozzle에서 가장 심하게 일어난다. 또한 IP 터빈의 First-stage Nozzle도 취약한 부분이라고 할 수 있다.

SPE에 의해 야기되는 효율 손실은 주로 Nozzle과 Bucket의 Profile의 변화(증기유로 면적의 증가), 증기유로의 표면거칠기의 증가 그리고 Spill Strips 간극의 증가로 인한 것이다.

Control Stage에서의 SPE 현상은 IP 터빈의 First-stage에서의 SPE 현상과는 다르다. 4개의 Control 밸브로 운전되는 Partial Arc 운전에서 1st 밸브 포인트(25% 부하)와 2nd 밸브 포인트(50% 부하)에서 First-stage를 지나는 증기의 압력비는 각각 약 4:1 및 약 2:1이다. 이러한 두 조건은 First-stage 고정익에서 음속을 유발하게 되며, 높은 교축압력은 Erosion의 Threshold 속도인 700 ft/sec 이상으로 Solid Particle을 가속시킨다. 이러한 높은 속도의 Solid Particle은 Figure 11 (a)에서 보여주는 바와 같이 First-stage 고정익의 Concave 측(pressure side)을 침식시킨다.

IP 터빈의 First-stage에서 증기 속도와 압력은 Control Stage보다 낮기 때문에 Solid Particle은 Threshold 속도 이상으로 가속되지 않으므로 Concave

측에 Erosion이 발생하지 않는 대신에 증기 속도보다 현저히 낮은 속도에서 움직이는 Solid Particle은 회전익의 Convex 측(Suction Side)의 입구쪽을 때린다. 그들은 다시 튕겨져 나오고 Figure 11 (b)에서 보여주는 바와 같이 고정익의 Convex 측(Suction Side)에 침식을 유발한다. Figure 12에서는 SPE에 의해 손상된 HP 및 IP First-stage 고정익을 보여주고 있다.

Control Stage의 회전익에서의 SPE는 Figure 13에서 보여주는 것과 같이 Convex 측의 입구와 Concave 측의 출구에 발생한다. 회전익으로 들어오는 입자는 금속을 마모시켜 Leading Edge를 날카롭게 함으로써 효율의 관점에서 그것은 Off-angle 손실을 유발한다.

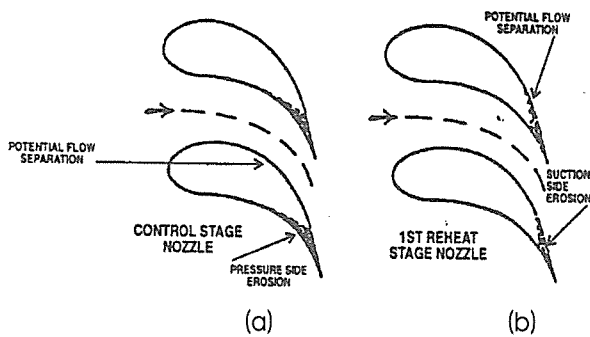


Figure 11. SPE로 인해 손상된 HP 및 IP First-stage Stationary Blade

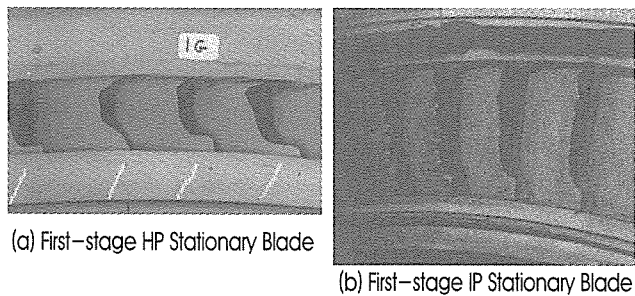


Figure 12. SPE에 의해 손상된 Stationary Blade

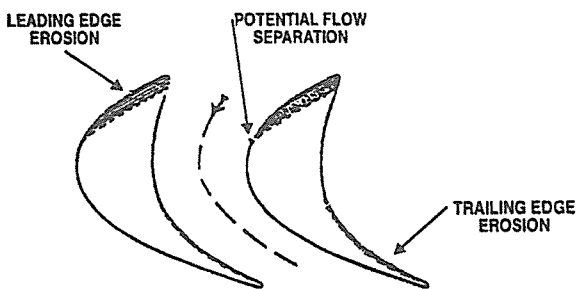


Figure 13. SPE로 인한 Control Stage의 회전익 손상

SPE로 인한 First-stage 효율손실은 고정익의 Throat Area의 증가를 계산하여 증가된 Area로 인해

효율손실 퍼센트를 곱해줌으로써 계산되어지며, 출력 손실에 대한 계산은 식(8)과 같다.

$$KW_{Loss} = (Eff. Loss)_{1\% \text{ Increase of Throat Area}} \times \frac{\% \text{ Area Increase}}{100} \times Loss \text{ Factor} \times KW_{STAGE} \quad (8)$$

- 여기서  $(Eff. Loss)_{1\% \text{ Increase of Throat Area}}$  : Throat Area의 1% 증가에 따른 효율 손실 퍼센트
- $\% \text{ Area Increase}$  : Throat Area의 증가율
- $KW_{STAGE}$  : Stage가 가지는 출력 (KW)

### 2.2.1 증가된 Throat Area의 측정 및 계산

SPE에 의한 First-stage 효율 손실을 계산하기 위해서는 고정익의 목면적(throat area)의 측정은 필수적이다. 목면적 측정은 목면적 증가량을 정확하게 결정할 수 있게 한다. 그러나 목면적의 측정에는 많은 시간이 소요되므로 다음의 목면적 측정방법은 비용이 작게 들고 Overhaul 일정에 간섭을 주지 않는다.

Throat Area 증가율의 결정은 아래의 2가지를 모두 고려해야 하며 다음과 같다.

- 고정익의 Profile 감소에 의한 Throat Area의 증가율
  - Trailing Edge 두께의 감소에 의한 Throat Area의 증가율
- 전체 목면적 증가는 Profile 감소에 의한 목면적 변화와 Trailing Edge 두께의 감소로 인한 목면적 변화의 합이다.

- 고정익의 Profile 감소에 의한 Throat Area의 증가율 계산

먼저 Figure 14에서 보여주는 4개의 SPE 손상 유형에 일치하는 고정익이 몇 개인지를 결정한다. 그리고 손상이 없었던 초기의 Trailing Edge에서 가장 깊은 침식부까지의 거리 "d"를 측정한다. 또한 Figure 15에서 보여주는 것처럼 증기유로 길이 lsp를 측정한다. Profile의 감소는 d/lsp이다. 면적비 대 Profile 감소, d/lsp 곡선을 Figure 16에 대입한다. Figure 16에서 각도는 충동형 터빈은 13o 이고, 50% 반동 터빈은 20o 이다. 또한 그 각도는 측정값 또는 Pitch(p), 목 두께(t)로부터 계산할 수 있다. 각도의 Sine 값은 t/p와 같다. 만약 면적비가 1.1이면 면적의 증가는 10%가 된다.

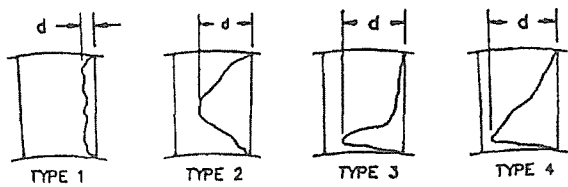
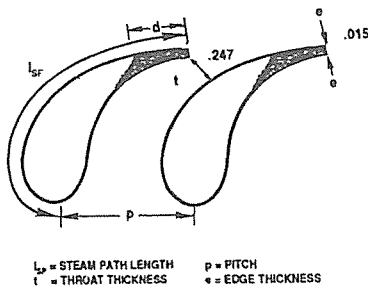


Figure 14. 고정익에서 발생하는 전형적인 SPE의 4가지 유형

Figure 15. Control Stage의 고정익으로부터 Profile(d/lsp)를 측정하는 방법



- Trailing Edge 두께의 감소에 의한 Throat Area의 증가율 계산

Profile 손실에서 부가적으로 Trailing Edge 두께는 4개의 Erosion 유형 모두에서 침식으로 얇아진다. 이것은 부가적인 Throat Area의 면적비를 증가시키며, 이러한 증가량은 Edge 두께(e)를 Throat Thickness(t)로 나누어 계산한다.

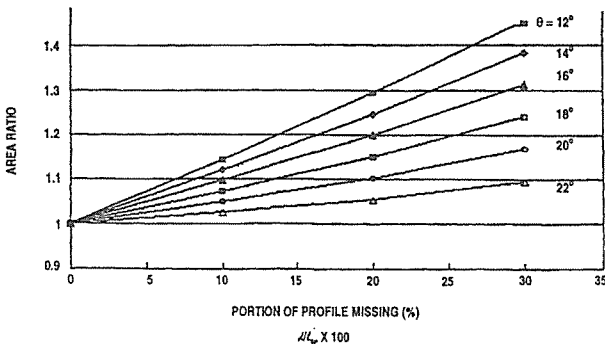


Figure 16. Profile 감소분의 측정으로부터 목면적 비의 증가량을 계산하는 방법

### 2.3 Deposits 및 Surface Roughness가 터빈의 효율에 미치는 영향

적절하지 않은 수처리(water chemistry)로 인해 보일러 내에 포함된 불순물들이 터빈의 증기유로(steam path)로 유입되어 블레이드에 불순물들이 침적될 수 있다. 이러한 불순물의 증기유로 내의 침적은 설비의 효율, 용량 그리고 신뢰성에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

터빈의 성능에 영향을 미치는 Deposits는 Deposits의

두께, 위치에 의존하게 되고 그에 따라 표면거칠기가 증가하게 된다. 이러한 Deposits는 노즐이나 블레이드의 Profile의 변화를 야기함으로써 Surface Roughness의 영향과 마찬가지로 에너지 분배와 공기 역학적인 Profile의 변화를 가져와 손실을 가져오게 된다.

만일 Deposits가 매끈하고 균일하게 생성되면, 면적 변화로 인한 손실의 크기는 Solid Particle Erosion에 의한 손실과 유사하다. 그러나 만일 Deposit된 표면이 매우 거칠다면, 큰 손실이 발생되며, 특히 고압부에서는 심하다고 할 수 있다. 고압부에서 발생된 Deposits에 의한 주요 영향 중의 하나는 교축유량이 감소함으로써 야기되는 터빈의 출력감소이다.

Deposits는 Stage에서 가장 낮은 압력과 온도 지점에서 쌓이게 되는데, 순수 증동 터빈에서는 주로 First-stage 고정익의 Throat에서 Trailing Edge까지 Convex 측에서만 침적되는 반면 Stage의 반동도가 증가할수록 고정익 뿐만 아니라 회전익에도 침적되게 된다. 50% 반동 Stage에서는 회전익과 고정익에 침적되는 Deposits의 양은 거의 동일하다. Figure 17에서는 증동터빈의 블레이드에서 침적되는 Deposits의 위치를 보여주고 있다.

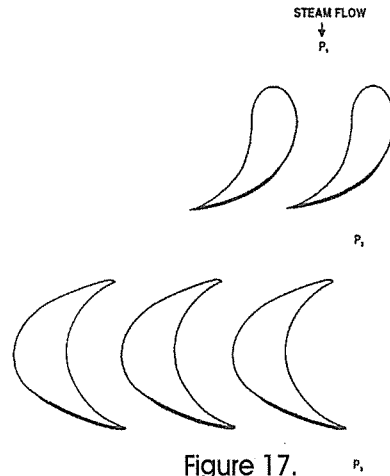


Figure 17. 증동 터빈의 블레이드에 침적되는 Deposits의 위치

### 증동 터빈의 블레이드에 침적되는 Deposits의 위치

Deposits의 침적에 따른 출력손실을 계산하는 방법은 식(9)와 같다.

$$KW Loss = BL \times SL / BL \times L.C \times L.F \times KW_{STAGE} \quad (9)$$

여기서  $BL$ 은 Blade Loss  $L.C$ 는 Local Correction  
 $SL$ 은 Stage Loss  $L.F$ 는 Loss Factor  
 $KW_{STAGE}$ 는 Stage Kilowatt( $\frac{w_t U E_{HP}}{3412.1 \times \text{No. of Stage}}$ )



### 2.3.1 Blade Loss

침전물이 블레이드에 쌓일 경우 표면거칠기는 증가하게 된다. 블레이드의 표면에서 증가된 표면거칠기는 증기의 원활한 유동에 대한 저항으로 나타나게 되며, 이러한 저항으로 인해 블레이드의 효율이 감소하게 되는데, 특히 HP 터빈에서 가장 큰 효율손실이 발생하게 된다.

그러므로 이러한 블레이드의 표면거칠기 증가로 인해 블레이드에서 손실이 발생하는 것을 블레이드 손실(blade loss)이라고 하며, 블레이드 손실은 설계시의 블레이드의 표면거칠기와 Deposits이 침적됨으로써 증가된 표면거칠기로 인한 블레이드 효율을 비교함으로써 계산되어질 수 있다.

Figure 18에서는 각 Section별 표면거칠기에 따른 블레이드의 효율 보정인자를 보여주고 있다. Figure 18을 이용하여 침적된 표면거칠기를 대입하여 블레이드의 효율 보정인자(correction factor)를 계산하고 이를 설계시의 블레이드 효율 보정인자에서 빼주면 블레이드의 손실(blade loss)이 계산될 수 있다. Figure 19에서는 HP Stationary Blade에 침적된 Deposits를 보여주고 있다.

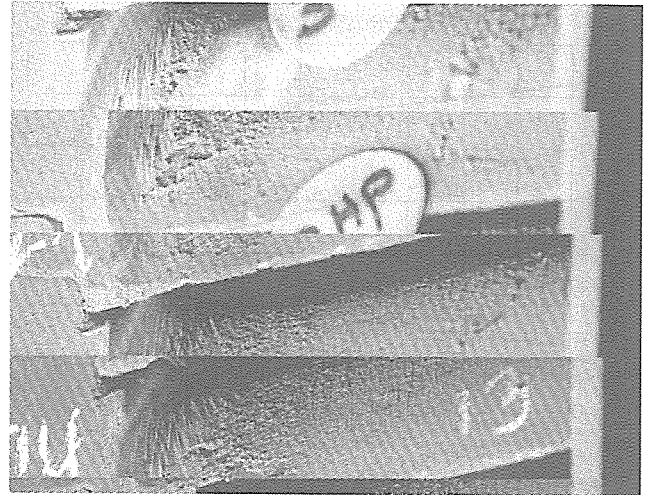


Figure 19. HP Stationary Blade에서 침적된 Deposits

### 2.3.2 Stage Loss

고정익과 회전익에서 발생한 유동저항 손실 즉 마찰손실은 증동형과 반동형에 따라 Stage의 에너지에 미치는 영향이 다르다. 50% 반동 Stage에서는 Stage의 압력에너지의 50%는 고정익에 있고, 나머지는 회전익에 존재하게 된다. 그러므로 1%의 고정익 손실은 0.5%의 Stage 손실을 초래하게 된다. 반면에 순수 증동 Stage에서 Stage의 압력에너지는 고정익에 있으므로 1%의 고정익 손실은 1%의 Stage 손실을 야기하며, 1%의 회전익 손실은 0.25%의 Stage 손실을 야기하게 된다(회전익의 에너지는 Stage 에너지의 절반이므로).

고정익의 경계층 손실이 약 2% 일 경우 50% 반동 Stage에서는 1%의 Stage 손실을 유발한다. 그러나 순수한 증동 Stage에서 Stage 손실은 2%가 된다.

50% 반동 터빈에서 회전익의 경계층 손실이 약 2% 발생하였을 경우 약 1%의 Stage 손실을 유발한다. 그러나 증동 Stage의 회전익의 경계층 손실이 약 4% 발생하였을 경우 4%가 유발하는 Stage 손실은 단지 1%이다. 50% 반동 Stage에서 경계층 손실의 총합은 2.0% 이다. 이 값은 증동 Stage의 손실 3%보다 작다. 그러므로 반동 Stage가 증동 Stage에 비해 마찰손실(경계층 손실)이 작음을 보여주고 있다.

Figure 20에서는 터빈의 반동도에 따라 블레이드의 손실이 Stage의 손실에 미치는 영향을 보여주고 있다.

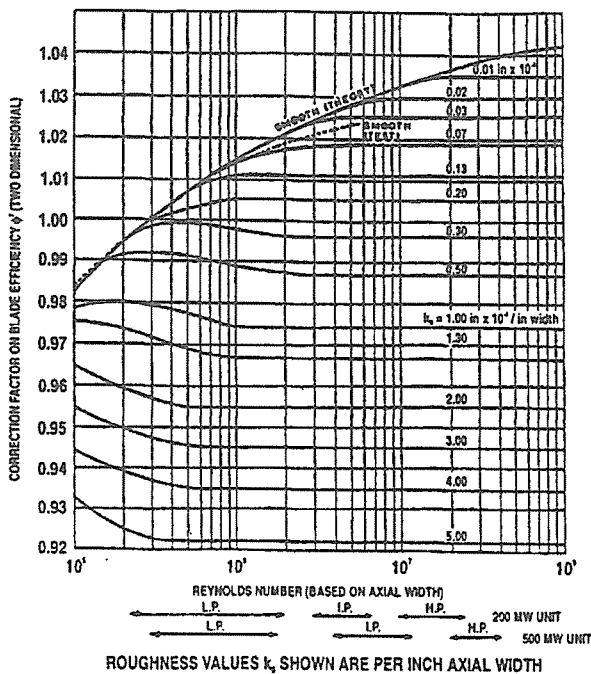


Figure 18. 증동과 50% 반동 Stage에서 표면거칠기에 따른 블레이드 효율의 보정인자

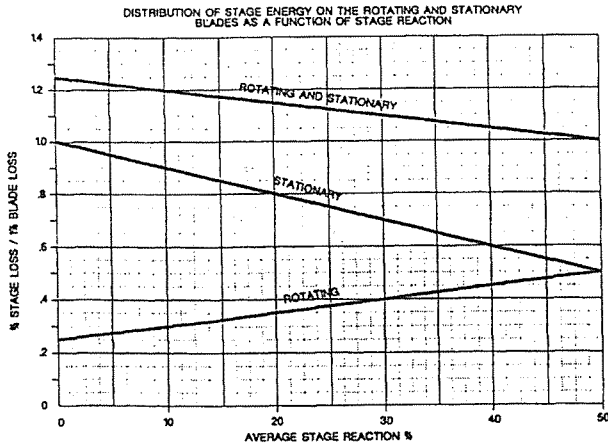


Figure 20. 반동도에 따라 블레이드의 손실이 Stage 손실에 미치는 영향

### 2.3.3 Local Correction

Figure 18은 블레이드의 전체가 동일한 표면거칠기를 가지고 있다고 가정하여 계산된 것이다. 그러나 침전물은 터빈 블레이드의 일정 부분에 국한되어 존재하므로 이러한 국부적인 표면거칠기에 대한 효율손실을 보정해야 할 것이다. 블레이드의 표면에 쌓인 Deposit는 발생 위치와 발생된 면적 비율에 따라 효율에 미치는 영향이 달라질 것이므로 이를 고려한 효율손실 보정을 수행해야 할 것이다.

Convex 측과 Concave 측의 영향을 정량화 시키기 위해 특별한 시험을 수행한 결과, Trailing Edge로부터 처음의 1/3 부분은 약 3%의 손실을 보여주었고, 2/3 부분은 부가적으로 25% 손실을 보여주었고, 마지막은 0.5%의 손실을 보여주었다. 그 시험을 Concave 측에 대해서도 수행한 결과, 손실은 3 대 1의 비율로 Convex 측면에서 보다 작았다. Concave 측과 Convex 측 모두에 대해 시험한 결과 손실은 8%였다. Convex 측이 Concave 측보다 3배 정도 민감하다는 것을 보여주었고, Trailing Edge는 Leading Edge 보다 6배 정도 민감하다는 것을 보여주었다. 이것은 Convex 측에서의 매우 높은 속도 때문이다. 만일 침전물이 Trailing Edge에서 Convex 면의 1/3(33%)만 축적되었다면, 마찰손실은 Figure 18로부터 계산된 값의 39%일 것이다. 이런 특수한 시험의 결과가 증가된 표면조도에 따라 전체 블레이드에 대한 손실의 퍼센트로서 Figure 21에서 보여주고 있다.

중요한 부위(critical area)는 Convex 측의 Throat로부터 Trailing Edge까지 이다. 이곳이 침전물이 두껍게

쌓이는 영역이고, Foreign Object Damage로 인해 표면조도가 증가하는 영역이다.

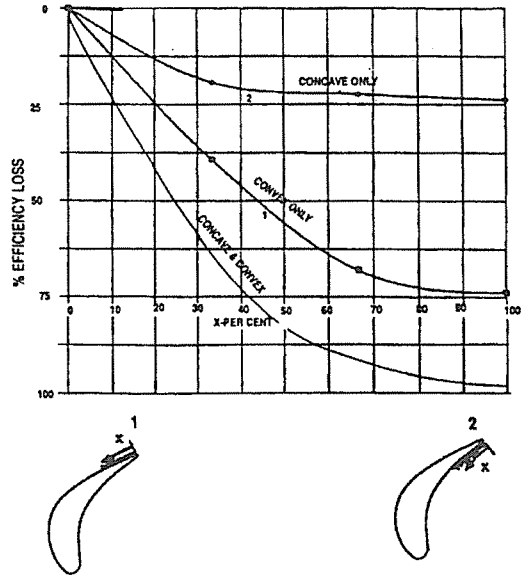


Figure 21. 블레이드의 발생 위치와 발생면적 퍼센트에 대한 효율변화

## 2.4 Miscellaneous Loss

이미 기술한 Leakage, Solid Particle Erosion 그리고 Deposits 외에도 발생할 수 있는 손실은 Mechanical Damage에 의한 손실, Tip 아래의 Cover Deposits에 의한 마찰손실 그리고 Trailing Edge Thickness 증가에 의한 손실이 있다.

### 2.4.1 Mechanical Damage

산화스케일 외의 외부 이물질(foreign object) 등이 증기유로로 유입됨으로써 블레이드에 손상이 발생되었을 때를 말하며, 심각한 손상은 고정익 및 회전익의 면적의 변화를 야기하며, 매우 거친 표면거칠기를 유발할 수 있다. 기계적 손상으로 인한 마찰의 증가, 유량의 증가 및 감소 그리고 표면거칠기 등을 계산하며, 계산하는 방법은 이미 기술한 방법을 적용한다. 이러한 기계적 손상은 보통 점진적으로 발생하는 것이 아니라 갑자기 발생하게 되므로 핵심압력(key pressure)의 급격한 변화로부터 유추가 가능하다.

### 2.4.2 Cover Deposits

회전익 Tip 또는 Cover 아래에 Deposits가 침적됨으로써 증기의 유로면적의 변화로 인한 효율손실을 말

한다. 이러한 효율손실의 계산은 설계면적에 대한 면적변화를 계산함으로써 평가한다.

### 2.4.3 Trailing Edge Thickness

고정익을 보수하게 되면 설계시의 Trailing Edge의 두께보다 두꺼워지게 된다. 이러한 두께의 증가는 증기 후류의 유동장애와 면적변화를 유발하여 효율손실이 발생하게 된다. 이러한 효율손실의 계산은 증기유로 면적비를 계산함으로써 가능하다.

## 3. 경제성 평가(economic evaluation)

터빈의 수명이 끝날 때까지 최적의 열적 성능을 유지하기 위해서는 성능시험 및 시험 데이터의 적절한 해석과 터빈 분해검사 기간 동안 증기유로 검사(steam path audit)가 필요하다. 증기유로 검사를 통해 초기 설계조건으로부터 효율저하의 근원적 원인이 분석되어야 한다. 이러한 정확한 원인분석은 효율향상을 위한 계획을 세우게 함으로써 더 큰 효율저하를 최소화할 수 있다.

OVHL 기간 동안 터빈 효율을 증가시키기 위해 취해진 조치사항은 결국에는 연료비용을 절감하고 최대 출력을 증가시킬 수 있다.

터빈의 수명이 다할 때까지 전기를 생산하기 위해 고가의 연료가 소비되기 때문에 터빈의 효율은 매우 높은 가치를 가지고 있다.

그러므로 증가된 열효율의 향상으로 인한 연료소비용의 감소를 정량적으로 계산하는 경제성 평가는 매우 중요하며, 이러한 경제성 평가의 결과를 토대로 터빈의 개보수 등 정비계획을 수립해야 할 것이다. 이러한 경제성 평가를 위한 연간 연료절감 비용(annual fuel savings, AFS)을 계산하는 식을 식(10)에서 보여주고 있다.

$$AFS = \frac{KW \times CF \times FC \times \Delta HR \times 8760 \times SHR}{10,000,000,000} \quad (10)$$

여기서, AFS : 연간 연료 절감(원/Year)

8760 : 1년(hr)

KW : 정격 출력

SHR : Station Heat Rate[BTU/kWh]

CF : Capacity Factor(%)

FC : 연료비(원)/million BTU

$$\Delta HR : \text{성능개선}(\%) = (\text{Heat in} - \text{Heat out}) / \text{kW} \quad [\text{BTU/kW(h)}]$$

그러나 연간연료 비용을 절감하기 위해 설비의 개보수를 필요로 할 경우 개보수에 의한 효율증가로 인해 생기는 가치를 현재가(present value)로 환산하고 이를 개보수 비용과 비교함으로써 개보수의 수행여부를 결정해야 할 것이다.

현재의 가치를 계산하는 방법을 식(11)에서 보여주고 있다. 식(10)에서 계산된 것처럼 일련의 연간 연료 절감, AFS<sub>1</sub>, AFS<sub>2</sub>, --- AFS<sub>n</sub>을 고려한다. 여기서 첨자는 현재 시간으로부터의 해당 년도를 나타내며, 첨자 n은 계산에서의 마지막 년도를 나타낸다. 이러한 연간 연료 절감의 현재 가치(present value)는 식(11)과 같이 정의된다.

$$PV = AFS_1 / (1+r) + AFS_2 / (1+r)^2 + \dots + AFS_n / (1+r)^n \quad (11)$$

여기서, r은 소수로서 표현되며 투자에 대한 회수율(rate of return on investment) 또는 할인율(discount rate)이다.

만일 AFS<sub>1</sub> = AFS<sub>2</sub> = AFS<sub>n</sub> = AFS 이라면 현재 가치의 표현식은 식(12)와 같다.

$$PV = AFS_1 / (1+r) + AFS_2 / (1+r)^2 + \dots + AFS_n / (1+r)^n = (AFS/r) \{1 - [1/(1+r)]^n\} \quad (12)$$

## 4. 결 언

이상과 같이 터빈의 성능이 저하되는 주요 요인을 기술하였고, 그에 따른 성능저하를 정량적으로 계산할 수 있는 방법을 보여주었다. 장기간 사용된 노후 터빈이 폐기될 때까지 최적의 성능을 유지하기 위해서는 증기유로의 성능저하 요인과 그에 따른 정량적인 성능평가 그리고 경제성 평가를 통해 정확한 조치사항과 향후의 정비계획을 수립해야 할 것이다.