

〈論 文〉

# 증기터빈 익렬유동의 에너지손실에 관한 실험적 연구

안형준\* · 권순범\*\* · 이권희\*\*\*

(1995년 1월 17일 접수)

## An Experimental Study on Energy Losses in Steam Turbine Cascade Flow

Hyung-Joon Ahn, Soon-Bum Kwon and Kwon-Hee Lee

**Key Words :** Total Pressure Loss(전압손실), Rayleigh Pitot Formula(레이리 피토공식), Supersonic Flow(초음속흐름), Steam Turbine(증기터빈), Load Increment Ratio(부하증가율), Nonequilibrium Condensation(비평형 응축)

### Abstract

The irreversibility of condensation process in the supersonic flow of steam turbine cascade causes the entropy to increase and the total pressure loss to be generated. In the present study, in order to investigate the moist air flow in two dimensional steam turbine cascade made as the configuration of the last stage tip section of the actual steam turbine moving blade, the static and total pressures along suction side of the blade are measured by pressure taps and Pitot tube. The flow field is visualized by a Schlieren system. The effects of stagnation temperature and the degree of supersaturation on energy loss and entropy change in the flow are clearly identified.

### 기 호 설 명

- $k$  : 비열비
- $L$  : 동익의 익현장(mm)
- $LD$  : 부하
- $M$  : 마하수
- $P$  : 압력(kPa)
- $Ra, Rv$  : 공기 및 수증기의 기체상수
- $s$  : 엔트로피
- $S$  : 과포화도
- $T$  : 절대온도(K)
- $x, y$  : 동익선단을 중심으로 한  $x, y$ 좌표
- $\lambda$  : 부하증가율

우 중요한 요소이다. 습분의 발생은 터빈저압단에서 침식(erosion)을 야기시키며 특히 Baumann에 의하면 1%의 습분증가는 1% 정도의 효율감소<sup>(1)</sup>가 동반된다고 할 정도로 터빈의 효율에 지대한 영향을 미친다.

증기터빈은 발전소설비중 단위기기로는 상당한 고가이며 MW당의 건설비용의 절감과 함께 효율증가의 관점에서 점차 대형화되고 있는 실정이다. 한편 출력이 큰 대형의 저압터빈에서는 증기의 비체적(specific volume)이 크기때문에 증기통로의 면적을 크게 할 필요가 있다. 즉, 저압터빈에서는 동익의 대형화가 필연적이다. 터빈 최종단근방에서 동익의 대형화가 이루어지면 그에 비례하여 동익선단부의 원주속도가 증가하게 되고 동익에 대한 습증기의 상대속도는 동익의 부위에 따라 초음속으로 되어 비평형과정의 응축(nonequilibrium condensation)이 동반되게 된다.

### 1. 서 론

증기터빈에서 습증기는 터빈의 효율관점에서 매

\*정회원, 한국원자력안전기술원

\*\*정회원, 경북대학교 기계공학과

\*\*\*경북대학교 대학원 기계공학과

화력발전의 경우 고압터빈은 등엔트로피 유동에 가까운 과열증기상태로 운전되고 저압터빈의 마지

막 몇 개의 단에서는 습증기상태로 운전되는 반면, 원자력발전의 경우에는 노의 안전성때문에 터빈입구(압력 5~7 MPa, 온도 270°C 정도)에서부터 출구까지 전단에 걸쳐서 포화증기상태로 운전된다.<sup>(1)</sup>

따라서 화력발전용 터빈에서는 저압터빈 최종단 부근에서, 그리고 원자력발전용 터빈에서는 거의 전단에 걸쳐서 습증기가 초음속으로 팽창되어 비평형과정의 응축이 일어나기 때문에, 익렬유동은 엔트로피의 급격한 증가가 수반되고, 압축파, 팽창파 및 경사충격파가 동시에 발생하며, 습증기의 건도(quality)가 낮은 경우에는 응축충격파가 발생하게 된다.<sup>(2,3)</sup>

증기터빈에서는 비평형과정의 응축으로 인하여 에너지손실이 존재하고, 이러한 에너지손실은 전압손실로 표현될 수 있다.<sup>(4,5)</sup> 증기터빈에서 일어나는 에너지손실중 가장 대표적인 것은 증기의 응축에 기인되는 습손실(wetness losses)<sup>(6)</sup>이며 이는 다음과 같은 손실로 나누어진다.

(1) 증기가 수적으로 응축할 때 수적과 증기사이 에 비가역적인 잠열수수로 인해 발생하는 열역학적 손실

(2) 정익의 표면에서 방출되는 속도가 낮은 粗大 수적과 고속의 증기사이의 마찰손실

(3) 동익면상의 수막이나 수적이 원심력에 의하여 익선단방향으로 이동하는데 소모되는 손실

(4) 동익전연의 배면측에 수적이 충돌하여 동익이 회전방향과 역방향의 제동력을 받기 때문에 생기는 손실

(5) 기타손실

초음속 유동장에 있어서의 응축현상 및 습손실과 관련하여 지금까지 다수의 연구가 수행되어 왔다. Wegener<sup>(7)</sup>가 원호노즐에서 응축을 동반한 팽창흐름을 연구한 이래, Nagayama 등<sup>(8)</sup>은 건공기와 습공기를 초음속 익렬유동에 적용하여 응축이 유동에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였으며 습도는 아음속유동장에서는 영향을 주지 않으나 초음속유동장에서는 응축에 따르는 잠열방출로 인하여 전압손실(total pressure losses)에 상당한 영향을 줌을 알았다. Kwon 등은 응축을 동반하는 초음속노즐유동에 대하여 전압손실을 실험<sup>(9)</sup>과 수치해석<sup>(10)</sup>으로 연구하였으며, Skillings<sup>(11)</sup>는 터빈익렬유동의 응축현상에 대하여 실험을 수행하여 입구과열도와 출구 마하수에 따른 후연충격파(trailing edge shock) 및 응축으로 기인된 충격파의 진동에 대하여 연구하였

다. 최근 Kwon 등<sup>(12)</sup>은 실제의 증기터빈 저압단의 익렬유동에 대하여 정압 및 마하수 분포와 관련된 유동특성을 연구하였다. 그러나 터빈 익렬유동에서 비평형과정의 응축에 기인되는 습손실 및 에너지손실에 대한 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 위에서 언급한 여러가지 습손실중 열역학적 손실, 즉 수증기의 비가역과정의 응축에 의한 전압손실을 실험적으로 구명하고자 한다.

작동유체로는 수증기와 거동이 유사한 습공기를 사용하였으며 정압 및 전압측정과 함께 슈리렌 가시화실험을 통하여 정체점 온도 및 과포화도가 전압손실과 엔트로피의 변화에 미치는 영향을 조사하였고 부하증가율(load increment ratio)<sup>(13)</sup>도 구하였다.

본 실험에 사용된 터빈익렬은 현재 국내의 발전용 증기터빈 저압최종단 동익선단의 단면으로 2차 원화한 것을 대상으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서 사용된 풍동은 대기간헐 흡입식 초음속풍동(intermittent indraft supersonic wind tunnel)으로서 Fig. 1과 같으며 저기조(reservoir), 측정부 및 진공탱크로 구성된다. 여기서, 저기조 및 진공탱크의 용량은 각각 44 m<sup>3</sup> 및 5 m<sup>3</sup>이다. 저기조내의 정체점 상대습도 및 정체점 온도는 저기조내에 제습기, 가열기 및 순환팬을 설치하여 조절하고 디지털온습도계(CHINO Co., model HN-K)를 이용하여 측정하였다. 진공탱크의 압력을 약 1 kPa 이하로 유지한 후 측정부 하류에 설치된 밸브를 열면 측정부에서는 약 10초간의 정상상태가 유지되었고 이때 측정부의 압력을 측정하고 슈리렌사진을 촬영하였다.

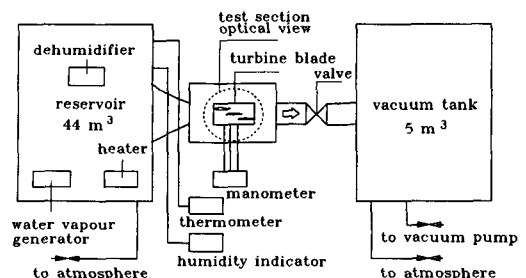


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

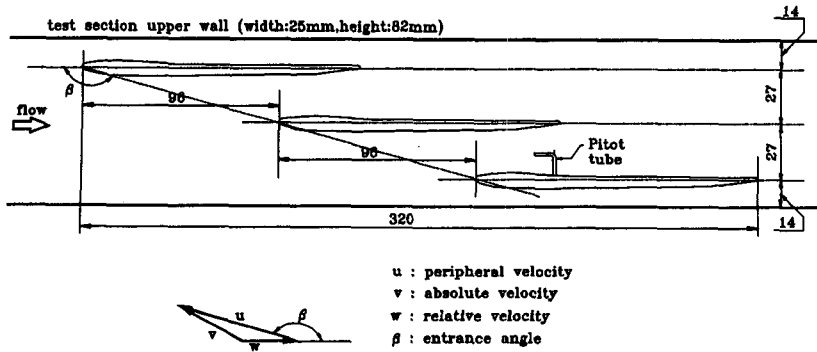


Fig. 2 Schematic of test section

측정부는 폭 25 mm, 높이 82 mm인 4각 투명 덕트이며, 덕트내에는 3장의 동익을 Fig. 2와 같이 설치하였다. 동익의 상대적인 고정위치는 실제 증기터빈 동익들의 기하학적인 형상과 동일하게 되도록 동익 입구각( $\beta=160.09^\circ$ ), 동익 원주피치 ( $\sqrt{96^2+27^2}=100$  mm) 등을 고려하여 제작하였다.<sup>(9)</sup> 동익의 형상은 Fig. 3에 나타내었으며 이것은 현재 국내의 발전용 증기터빈 저압최종단 동익선단의 단면을 wire cutting에 의해 2차원으로 가공한 것으로서 익현장의 길이  $L=128$  mm이고 동익의 선단

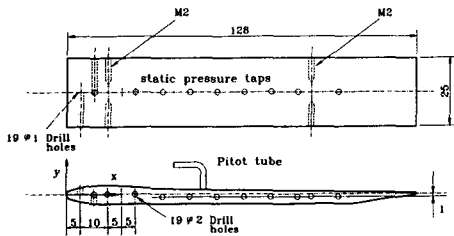


Fig. 3 Detail of a blade

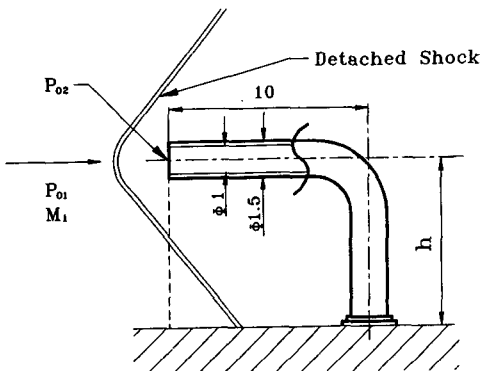


Fig. 4 Detail of Pitot tube

을  $x, y$ 좌표계의 원점으로 하였다.

익 배면(suction side)상의 정압은 정압공을 통하여 수은마노미터로 측정하고, 전압은 배면상에 설치한 피토관을 통하여 측정하였다. 이때 측면벽의 영향이 없도록 배면상의 중심선을 따라 측정하였고<sup>(1)</sup> 상부벽의 영향이 최소화되도록 3개의 익중에서 3번째 익의 배면상 압력을 측정하였다. 여기서, 정압과 전압은 동일한 정체점조건에 대하여 각각 측정하였고 배면상 각 지점에 대한 전압은 각각 정체점조건을 동일하게 유지한 후 측정하였다. 또한 응축에 의한 정압공과 피토관의 막힘을 고려하여 동일한 조건에 대하여 실험을 수회 반복하였다. 본 연구에서 사용된 터빈익에 설치한 피토관의 형상은 Fig. 4와 같고, 피토관의 내경 및 외경은 측정에 주는 영향을 고려하여<sup>(14)</sup> 1.0 mm 및 1.5 mm 로 하였다. 익렬내 유동장은 Xe광원, 오목거울, 나이프엣지(knife edge), 카메라 등으로 구성된 슈리렌 시스템으로 가시화하였다.

본 연구에서는 증기터빈의 경우를 고려하여 정체점 상대속도 대신에 정체점 과포화도를 이용하였다. 정체점 과포화도는 정체점의 수증기 분압과 정체점 온도에 해당되는 수증기의 포화압력의 비로 정의되며,<sup>(4)</sup> 이는 곧 상대속도의 1/100과 동일한 값이다. 따라서 입구온도 및 과포화도를 주요 변수로 하고, 이에 따라 정압 및 전압을 측정하여 전압 손실량 및 엔트로피의 변화를 구하고 부하증가율을 계산하였다.

여기서, 피토관으로 전압을 측정할 경우 유동이 아음속이면 측정된 전압이 바로 그 지점의 전압이 되나 초음속이면 피토관의 입구에 의하여 실제의 유동에서는 존재하지 않는 이탈충격파(detached shock)가 발생된다. 이탈충격파의 영향을 보정하기

위하여 Rayleigh Pitot formula<sup>(14)</sup>를 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유동의 형태

Fig. 5는 정체점 온도  $T_0=298$  K, 정체점 압력  $P_0=101.3$  kPa, 정체점 과포화도  $S=0.4, 0.7$ 인 경우 증기터빈의 저압최종단 동익내의 유동에 대한 슈리렌 가시화사진과 그 유동장을 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 5에서 3장의 익중에서 중간익을 중심으로 볼때 경사충격파가 입사되는 부분이 배면(suction side)이고 아음속흐름이 지배적인 아래부분이 복면(pressure side)이다.

먼저 Fig. 5(a)를 보면 마하수가 서로 다른 배면 흐름과 복면흐름이 익의 후연에서 서로 만나 후류(wake)가 발생되고 있으며 이 후류로 인하여 경사충격파가 발생되고 있다. 한편 복면후연에서 발생된 경사충격파는 후방에 위치한 동익의 배면에 입사한 후 정상반사되고 있다. 동익선단으로부터의 거리  $x$ 를 익현장  $L$ 로 무차원화한 복면  $x/L=0.8$  과 배면  $x/L=0.06$  사이에서는 흐름이 초킹되는 위치가 존재하며 복면  $x/L=0.84$ 의 위치에는 반동

도를 높이기 위하여 동익을 경사지게 잘라낸 부분으로부터 Prandtl-Meyer 팽창파가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 유동의 형태를 Fig. 5(c)에 도식적으로 나타내었다.

Fig. 5(b)는 유동장의 전압을 측정하기 위하여 피토관을 유동장에 삽입한 경우이다. 이때 유동장이 초음속흐름인 관계로 피토관 앞에 이탈충격파가 발생하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 피토관에 의해서 측정되어지는 압력은 실제의 유동장에서는 존재하지 않는 이탈충격파 직후의 전압이 된다. 피토관에 의해 생성된 이탈충격파는 동익 배면에서 반사함으로써 피토관 하류의 흐름에 영향을 미치나 초음속 흐름에서는 하류의 유동상태가 상류의 흐름에 영향을 미치지 않는다. 따라서 피토관을 사용한 압력의 측정시 피토관을 삽입함으로써 야기된 하류의 유동 영향을 고려할 필요가 없다.

Fig. 6은 정체점 온도  $T_0=298$  K, 정체점 압력  $P_0=101.3$  kPa, 정체점 과포화도  $S=0.7$ 인 경우의 슈리렌사진과  $S=0.4, 0.7$ 인 경우 배면을 따라 측정한 정압을 정체점압력으로 무차원화한 압력분포를 나타낸 것이다. 배면의 정압분포를 보면 아음속 흐름이 유입한 후 전방익의 복면과 후방익의 배면이 이루는 면적의 감소에 따른 효과로 인하여  $x/L=0.06$  부근에서 음속에 도달하고 팽창은 전방익 복면의 후연에서 발생된 경사충격파가 입사되는

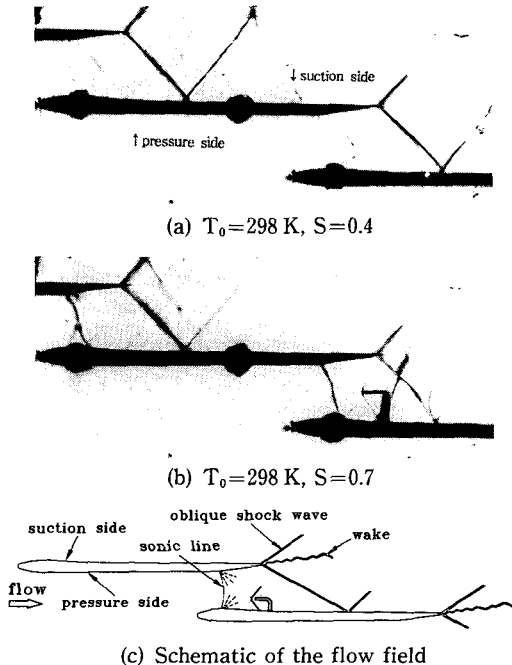
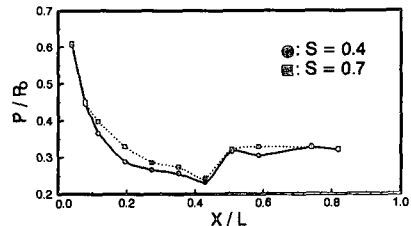
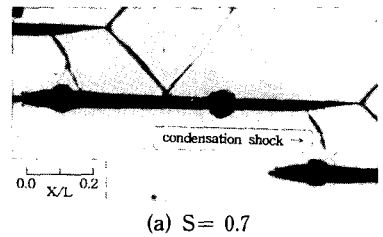


Fig. 5 Schlieren photograph and schematic of the flow field



(b) Distribution of static pressure of flow field at suction side

Fig. 6 Schlieren photograph and distribution of static pressure of flow field at suction side ( $T_0=298$  K,  $P_0=101.3$  kPa)

$x/L=0.42$ 까지 계속된다. 특히,  $x/L=0.28\sim0.42$  사이에서는 전방익 복면의 경사부분으로부터 발생된 Prandtl-Meyer 팽창파가 입사되기 때문에 압력이 급격히 감소되어야 하나 그 정도가 많이 완화되어 있다. 이는 유동장내의 초음속영역에서 발생한 비평형응축의 영향으로 잠열의 방출이 흐름을 감속시키기 때문이라고 생각된다. 또한 익후연으로부터 발생된 경사충격파가 입사되는  $x/L=0.42$  부근에서는 압력의 급격한 증가가 일어나고 이후는 거의 일정하게 됨을 알 수 있다.

동일한  $T_0$ 와  $P_0$ 인 경우에 대해서는 정체점 과포화도  $S$ 가 높을수록 정압은 커지게 됨을 알 수 있다. 즉, 마하수 분포에 있어서는 동일한  $T_0$ 와  $P_0$ 에 대해서는 정체점 과포화도  $S$ 가 높을수록 마하수의 분포가 전체적으로 낮게 된다. 이는 동일한  $T_0$ 와  $P_0$ 에 대해서는  $S$ 가 높을수록 정체점에 있어서의 수증기의 질량비, 즉 비습도(specific humidity)가 크게 되고, 이로 인한 비평형과정의 응축에 의한 응축량이 많아지고, 그에 따른 잠열의 방출량이 많아지게 되어 초음속 흐름인 배면유동인 경우가 열에 의해 흐름이 크게 감속되기 때문이라고 생각된다. Fig. 5(a)와 Fig. 6(a)를 비교해 보면 동일한  $T_0$ 와  $P_0$ 에 대해서 과포화도  $S=0.4$ 인 경우에는 거의 보이지 않던 응축충격파가  $S=0.7$ 인 경우에

초음속영역인  $x/L=0.16$  부근에서 선명하게 나타남을 알 수 있다.

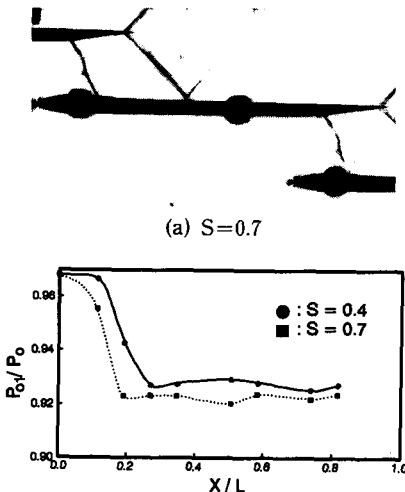
Fig. 7은 정체점 온도  $T_0=303$  K, 정체점 압력  $P_0=101.3$  kPa, 정체점 과포화도  $S=0.7$ 인 경우의 슈리렌 가시화사진과  $S=0.4, 0.7$ 에 대하여 동일 배면을 따라 측정된 전압분포를 나타낸 것이다. 이 경우 전압 측정위치는  $y=13$  mm인 곳이며, 세로 축은 국소전압  $P_{01}$ 을 정체점압력  $P_0$ 로 무차원화한 값이다. 여기서, 국소전압  $P_{01}$ 을 측정할 때 피토포관의 입구에 의한 이탈충격파의 영향을 보정하기 위하여 Rayleigh Pitot formula<sup>(14)</sup>를 이용한다. 즉 Fig. 4에 나타낸 기호를 참조하여 다음의 식 (1)에 의해 마하수  $M_1$ 을 구한다.

$$\frac{P_{02}}{P_1} = \left[ \frac{(k+1)M_1^2}{2} \right]^{\frac{k}{k-1}} \left[ \frac{k+1}{2kM_1^2 - (k-1)} \right]^{\frac{1}{k-1}} \quad (1)$$

여기서,  $P_1$  및  $P_{02}$ 는 측정된 정압과 전압이며  $k$ 는 비열비로서 습공기의 비습도를 고려하여 구한다. 식 (1)로부터 구한  $M_1$ 과 피토포관으로 측정된 전압  $P_{02}$ 를 이용하여 식 (2)에 의하여 피토포관이 없을 때의 실제 전압  $P_{01}$ 을 구한다.

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \left[ \frac{(k+1)M_1^2}{(k-1)M_1^2 + 2} \right]^{\frac{k}{k-1}} \left[ \frac{k+1}{2kM_1^2 - (k-1)} \right]^{\frac{1}{k-1}} \quad (2)$$

전압분포를 보면 비가역과정인 응축의 영향이 적은  $S=0.4$ 의 경우에는,  $x/L=0.13$  정도까지 전압의 감소가 거의 없다가 비평형과정의 응축이 일어나는  $x/L=0.13\sim0.28$ 의 영역에서 전압손실이 급격히 일어남을 알 수 있다. 비평형과정의 응축에 의해 습공기중 수증기의 응축이 완료되는  $x/L=0.28$  이후에서는 전압의 손실이 거의 없는 등엔트로피 과정으로 나타났다.<sup>(15)</sup> 한편  $S=0.7$ 의 경우에는 앞에서 기술한  $S=0.4$ 의 경우보다 초기 정체점에 있어서의 수증기의 질량비, 즉 비습도가 크게 되고 그에 따른 초음속 영역에서의 비평형과정에 의한 응축이 크게되고, 또한 낮은 국소과포화도(degree of local supersaturation)에서 응축이 일어난 결과  $x/L=0.1$  부근부터 전압손실이 일어나고 전압손실량도 전체적으로  $S=0.4$ 의 경우보다 크게 됨을 알 수 있다. 비평형응축도  $S=0.7$ 의 경우는  $x/L=0.2$  부근에서 끝나는데 비하여  $S=0.4$ 의 경우는  $x/L=0.27$  부근에서 완료되는 것으로 나타났다. 즉 비평형응축영역의 길이는 동일한  $T_0$ 와 유



(b) Distribution of total pressure of flow field at suction side

Fig. 7 Schlieren photograph and distribution of total pressure of flow field at suction side( $T_0=303$  K,  $P_0=101.3$  kPa,  $y=13$  mm)

동장에 대해서는  $S$ 가 클수록 좁아짐을 알 수 있다.<sup>(15)</sup> 한편 전방익 후연으로부터 발생된 경사충격파가 입사되는  $x/L=0.42$  부근에서의 전압손실이 없는 것으로부터 응축 혹은 응축충격파가 전압손실에 미치는 영향은 상당하다. 반면에 마하수 1.4 정도의 초음속에서 생성된 경사충격파가 전압손실에 미치는 영향은 미미하다는 것을 알 수 있다. 따라서 비평형과정의 응축은 엔트로피 증가가 수반되는 비가역과정으로 전압손실, 즉 에너지손실과 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있다.

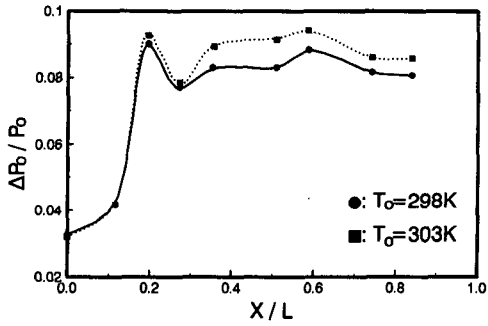
3.2 정체점상태가 전압손실 및 엔트로피변화에 미치는 영향

Fig. 8은  $S=0.7$ 인 경우  $T_0=298, 303\text{K}$ 가 전압손실에 미치는 영향을  $y=5\text{ mm}, 13\text{ mm}$ 에 대하여 나타낸 것이다. 여기서,  $\Delta P_0/P_0$ 는 전압손실량으로서 정체점 기준전압( $P_0$ )과 국소전압( $P_{01}$ )과의 차를  $P_0$ 로 나눈 값이다.  $y$ 에 관계없이 천음속 흐름인  $x/L=0.13$ 까지는 전압손실량도 적고 전압손실의 기울기도 작다가 국소과포화도가 높게되어 응축충

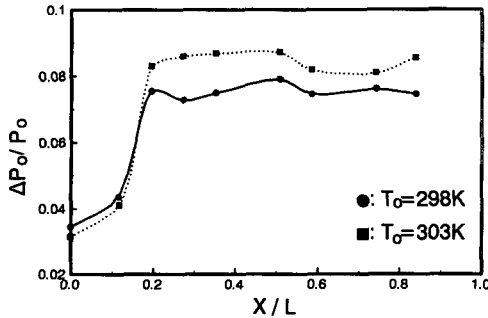
격파 혹은 비평형응축이 발생하는 위치와 거의 일치하는  $x/L=0.13\sim 0.2$  사이에서 전압손실이 급격히 증가하고 그 이후는 전압이 거의 일정하게 됨을 알 수 있다.

동일한 과포화도에 대하여는 정체점 온도가 높을수록 전압손실은 크게 나타났고, 동일한  $T_0$ 에 대하여는 전체적으로 동익의 배면에 가까운  $y=5\text{ mm}$ 의 경우가  $y=13\text{ mm}$ 의 경우에 비하여 전압손실량도 크게 나타났다. 이는 동일한 정체점 과포화도  $S$ 에 대하여  $T_0$ 가 높을수록 정체점 비습도가 크게 되어 비평형과정의 응축에 의한 응축량이 많아지고 배면에 가까울수록 유동마하수가 증가하며 그에 따라 국소과포화도가 증가하여 응축의 비가역성이 강화되기 때문이라 생각된다.

특히,  $y=5\text{ mm}$ 인 경우  $x/L=0.2$  부근에서 전압손실이 최대치로 된 이후 감소하다가 다시 증가하고 있다. 이는 복면 후연에서 발생된 경사충격파에 의해 유선(stream line)이 전향(deviation)되어 유선이 피토크에 임의의 역할을 가지고 유입하기 때문에 실제보다 전압손실량이 크게 나타나고, 이

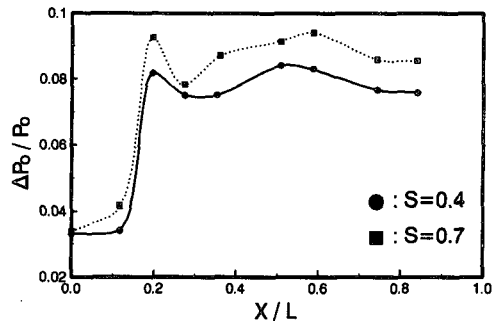


(a)  $y=5\text{ mm}$

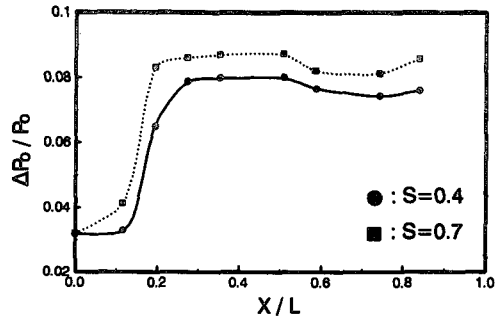


(b)  $y=13\text{ mm}$

Fig. 8 Effect of stagnation temperature on distribution of total pressure losses( $S=0.7$ )



(a)  $y=5\text{ mm}$



(b)  $y=13\text{ mm}$

Fig. 9 Effect of degree of supersaturation on distribution of total pressure losses( $T_0=303\text{ K}$ )

후의 위치에서 전압을 측정할 경우에는 피토포관 선단의 위치가 반사충격파의 하류에 위치하게 되어 유선이 반사충격파에 의해 전향된 각도만큼 반대방향으로 전향된 흐름이 피토포관 입구에 유입되기 때문으로 생각된다. 또한  $x/L=0.2$  부근 이후에는 전압손실률  $\Delta P_0/P_0$ 가 거의 일정하게 되는 것으로부터 엔트로피의 증가가 수반되는 비평형과정의 응축은  $x/L=0.2$  이전에서 거의 완료됨을 유추할 수 있다.

Fig. 9는  $T_0=303\text{ K}$ 인 경우  $S=0.4, 0.7$ 가 전압손실에 미치는 영향을  $y=5\text{ mm}, 13\text{ mm}$ 에 대하여 나타낸 것이다.

정체점 과포화도  $S$ 가 높을수록 전압손실률  $\Delta P_0/P_0$ 가 크게 되고 전체적인 경향은 Fig. 8과 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 앞에서 기술한 바와 같이 동일한  $T_0$ 에 대해서는  $S$ 가 높을수록 비습도가 크게 되며 이로 인한 비평형과정의 응축에 의한 응축량이 많아지기 때문이다.

Fig. 10(a)는  $T_0=303\text{ K}$ 인 경우에 있어서  $S$ 가 엔트로피 변화  $\Delta s$ 에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서,  $\Delta s$ 는 습공기중의 습분의 비가역 응축에

기인된 엔트로피의 변화로서 정체점 및 국소전압의 관계로부터 구할 수 있으며 단열과정으로 가정하면 식 (3)으로 표현된다.<sup>(12)</sup>

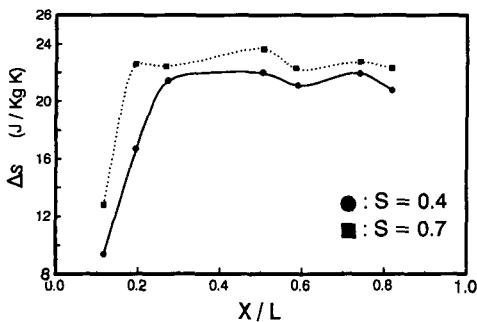
$$\frac{\Delta s}{R} = \frac{(s_{01} - s_0)}{R} = \ln \frac{P_0}{P_{01}} \quad (3)$$

여기서, 하첨자 0 및 01은 정체점 및 국소상태를 나타내며, 습공기의 기체상수는  $R=(1-\omega_0) \cdot Ra + \omega_0 \cdot Rv$ 로부터 구한다.  $\omega_0, Ra, Rv$ 는 각각 정체점의 비습도, 공기와 수증기의 기체상수이다.

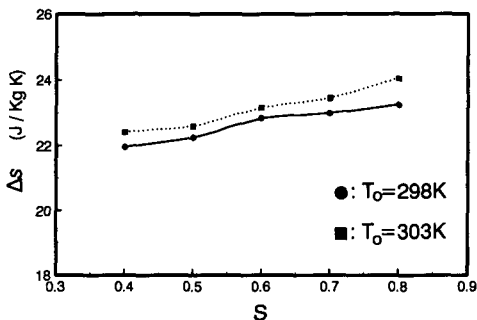
엔트로피변화는 응축충격파 혹은 비평형응축영역이 존재하는  $x/L=0.1\sim 0.2$ 에서 급격히 증가하고, 정체점 과포화도가 높을수록 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 비평형응축 혹은 응축충격파는 엔트로피의 증가를 수반하는 비가역과정이고, 동일한 정체점 온도에서는 정체점 과포화도가 높을수록 초기 정체점에 있어서의 비습도가 높아지고 이에 따라 응축의 비가역성이 강화되기 때문이라 생각할 수 있다. 특히,  $S=0.7$ 의 경우에는  $S=0.4$ 인 경우에 비해 응축충격파가 비평형 응축영역내에 존재하게 된 결과 전압감소률도  $x/L=0.1\sim 0.2$  사이에서 크게 됨을 알 수 있다.

Fig. 10(b)는 익선단으로부터의 무차원거리  $x/L=0.27$ 인 경우에 정체점 온도가 엔트로피변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

엔트로피 증가량은 동일한  $T_0$ 에 대해서는 과포화도가 높을수록 증가하고, 동일한  $S$ 에 대해서는 정체점 온도가 높은 경우가 높게 나타났다. 이는 과포화도가 높을수록, 정체점 온도가 높을수록 엔트로피 증가가 수반되는 비가역과정의 비평형 응축량이 많아지기 때문이라 생각된다.



(a)  $T_0=303\text{ K}, P_0=101.3\text{ kPa}, y=13\text{ mm}$



(b)  $X/L=0.27, P_0=101.3\text{ kPa}, y=13\text{ mm}$

Fig. 10 Effect of stagnation condition on distribution of entropy

### 3.3 부하증가율의 변화

부하증가율(load increment ratio)은 등엔트로피의 경우 익면상에 작용하는 부하를 기준으로 볼 때 실제 조건에서 응축의 영향으로 증가된 부하의 비로서 나타나며 부하증가율이 커지면 터빈익렬의 성능이 저하됨을 의미한다.

Fig. 11은  $T_0=294\text{ K}, S=0.4, 0.7$ 인 경우, 익의 배면에 작용하는 부하(load)를 구한 것이다. 여기서, 부하는 무차원정압과 단위폭에 대한 익표면적의 곱(즉, 그림에서 곡선하부의 면적)을 의미하며<sup>(13)</sup> 무차원으로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한  $T_0$ 에 대해서는  $S$ 가 클수록 익에 작

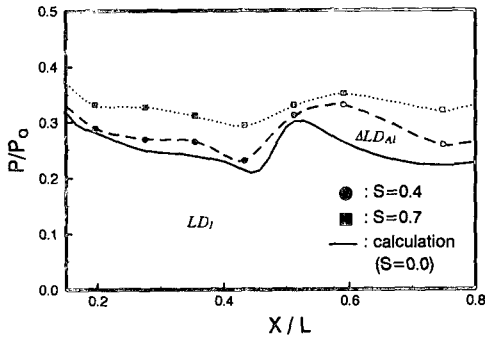


Fig. 11 Load and distribution of static pressure( $T_0=294\text{ K}$ ,  $P_0=101.3\text{ kPa}$ )

용하는 부하는 앞에서 언급했던 비평형과정의 응축의 영향으로 증가함을 보이고 있다. 한편 부하증가율  $\lambda$ 는 식 (4)로 표시할 수 있다.<sup>(13)</sup>

$$\lambda = \frac{LD_A - LD_I}{LD_I} = \frac{\Delta LD_A}{LD_I} \quad (4)$$

여기서,  $LD_I$  및  $LD_A$ 는 등엔트로피 및 실험결과에 의한 실제의 부하를 나타낸다. 그림에서 계산에 의한 곡선은 정체점 과포화도  $S=0.0$ 인 경우로서 Beam and Warming법에 의해 구한 2차원 수치해석결과이며 본 연구에서는 이 계산에 의한 곡선하부를  $LD_I$ 로 하였다. 그림에서  $LD_I=0.1625$ ,  $LD_{A(S=0.4)}=0.1842$ ,  $LD_{A(S=0.7)}=0.2167$ 로 나타났다. 따라서  $\lambda_{(S=0.4)}=13.4\%$ ,  $\lambda_{(S=0.7)}=33.4\%$ 로 된다. 즉,  $S$ 가 클수록 부하증가율은 증가함을 보이고 있다.

#### 4. 결 론

현재 국내의 발전용으로 사용되고 있는 증기터빈 저압최종단의 동익선단의 단면을 2차원화한 익렬유동장에 대하여 정체점 온도 및 과포화도에 따른 에너지손실을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 증기터빈 저압최종단 동익내의 초음속유동에 의해 발생하는 비평형과정의 응축이 전압손실의 주요한 원인이 되며, 동익후연의 경사충격파에 의한 전압손실은 응축충격파에 의한 전압손실에 비하여 매우 작다.

(2) 정체점 과포화도  $S$ 가 클수록, 정체점 온도  $T_0$ 가 높을수록 비평형과정의 응축에 의한 응축량이 많아져서 전압손실이 증가한다.

(3) 등엔트로피과정을 기준으로 한 부하증가율  $\lambda$ 는 정체점 과포화도  $S=0.4$ 인 경우 13.4%,  $S=0.7$ 인 경우 33.4%로 나타났으며  $S$ 가 클수록 증가한다.

#### 참고문헌

- (1) Moore, M. J. and Sieverding, C. H., 1976, *Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators*, McGraw-Hill, p. 105, p. 11, p. 132.
- (2) Troyanovskii, B. M., Maiorskii, E. V. and Garagulya, B. A., 1977, "Supersonic Cascade in the Last Stage of High-Capacity Steam Turbines," *Teploenergetika*, 24(10), pp. 7~12.
- (3) Maiorskii, E. V. and Troyanovskii, B. M., 1965, "An Experimental Study of Supersonic Flow in Turbine Cascades," *Teploenergetika*, 12(12), 69~72, pp. 93~98.
- (4) Deych, M. Y., Saltanov, G. A., Stepanchuk, V. F. and Orlova, V. M., 1969, "Study of Energy Losses in Condensation Discontinuities and Shocks in the Flow of Wet Steam," *Heat Trans. Soviet. Res.*, March, Vol. 1, No. 2, p. 135.
- (5) 秋葉雅史, 川岩裕之, 1985, "가스혼입地熱用ター빈の流體特性および性能," *日本機械學會論文集 B(昭60-9)*, 第51卷, 第469號, p. 2991.
- (6) 松尾一泰, 川越茂敏, 瀬戸口俊明, 園田圭介, 1984, "凝縮衝擊波の理論とその實例," *機械の研究*, 第36卷, 第6號, p. 84, 第4號, p. 100, 第1號, p. 74.
- (7) Wegener, P. P., "Gasdynamics of Expansion Flows with Condensation and Homogeneous Nucleation of Water Vapor," pp. 163~243.
- (8) 永山猛彦, 倉元堉夫, 今泉全通, 1982, "大氣吸入式衝擊風通を用いた翼列實驗における大氣湿度の影響," *日本航空宇宙學會誌*, 第30卷, 第337號, pp. 83~90.
- (9) 權純範, 松尾一泰, 川越茂敏, 1986, "凝縮を伴うラバルノズル流れの全壓損失(第1報, 實驗結果)," *日本機械學會論文集*, 第52卷, 第480號, pp. 2860~2864.
- (10) 權純範, 松尾一泰, 川越茂敏, 1987, "凝縮を伴うラバルノズル流れの全壓損失(第2報, 數値解析)," *日本機械學會論文集*, 第53卷, 第489號,



pp. 1516~1520.

- (11) Skillings, S. A., 1989, "Condensation Phenomena in a Turbine Blade Passage," *J. Fluid Mech.* Vol. 200, pp. 409~424.
- (12) 권순범, 윤의수, 김병지, 선우은, 1994, "증기터빈 익렬유동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제8호, pp. 2177~2183.
- (13) Evans, N. A., 1983, "Shock Wave/Boundary Layer Interaction in Dry and Wet Transonic Steam," *J. of Eng. for Power, Trans. ASME*, Vol. 105, pp. 782~790.
- (14) Kwon, S. B., 1986, "The Study of Characteristics of Condensation Shock Waves," Ph. D Thesis, Kyushu Univ., Japan.
- (15) Matsuo, K., Kawagoe, S., Sonoda, K. and Kwon, S. B., 1986, "Studies of Condensation Shock Waves(2nd Report, Relation between Condensation Shock Wave and Condensation Zone," *Bull. of JSME*, Feb. Vol. 29, No. 248, p. 439.