

〈論 文〉

## 증기터빈 익렬유동에 관한 실험적 연구

권순범\* · 윤의수\*\* · 김병지\*\*\* · 선우은\*\*\*

(1994년 1월 29일 접수)

### Experimental Study on Steam Turbine Cascade Flow

Soon-Bum Kwon, Eui-Soo Yoon, Byung-Ji Kim and Eun Sunwoo

**Key Words :** Supersonic Flow(초음속 흐름), Steam Turbine(증기터빈), Cascade Flow(익렬 유동), Schlieren Photograph(슈리렌사진), Nonequilibrium Condensation(비평형 응축)

#### Abstract

The rapid expansion or condensable gas such as moist air of steam gives rise to nonequilibrium condensation. As a result of irreversibility of condensation process in the supersonic cascade flow of low pressure steam turbine, the entropy of the flow is increased, and the efficiency of the turbine is decreased. In the present study, to investigate the flow of moist air in 2-dimensional cascade made as the configuration of the tip section of the last actual steam turbine moving blade, the static pressure at both sides of pressure and suction of blade are measured by static pressure taps and the distribution of Mach number on both surfaces of the blade are obtained by using the measured static pressure. Also, the flow field is visualized by a schlieren system. From the experimental results, the effects of the stagnation temperature and specific humidity on the flow properties in a 2-dimensional stationary cascade of a practical steam turbine blade are clearly identified.

#### 기 호 설 명

$\phi$  : 상대습도  
 $\beta$  : 동익 입구각  
 $k$  : 비열비  
 $M$  : 마하수  
 $p$  : 압력  
 $T$  : 온도  
 $x$  : 동익선단으로부터의 거리  
 $L$  : 동익의 전길이  
 $u$  : 동익의 원주속도  
 $v$  : 노즐출구에서의 유체의 절대속도

$w$  : 동익에 대한 유체의 상대속도

하첨자

$f$  : 동결

$o$  : 정체점

#### 1. 서 론

작동유체로서 수증기를 사용하는 발전용 터빈의 효율은 증기를 고온 고압화하든지 터빈을 대형화함으로써 높일 수 있다. 화력발전의 경우에는 터빈의 효율을 높이기 위하여 작동유체를 고온 고압화시키는 것이 재료과학적 측면에서 제한되므로 터빈의

\*정회원, 경북대학교 기계공학과

\*\*정회원, 한국기계연구원 열유체연구실

\*\*\*정회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

대형화, 즉 동익의 장대화가 필연적이다.<sup>(1)</sup> 특히, 증기터빈의 저압 최종단 부근에 있어서 작동유체인 과열증기는 습증기상태로 되고, 동익이 길어지면 그에 비례하여 원주속도가 증가되므로 동익에 대한 습증기의 상대속도는 초음속으로 된다.<sup>(2)</sup> 한편, 원자력발전 터빈의 경우에는 노의 안정성때문에 터빈의 입구부터 출구까지 거의 全段에 걸쳐 작동유체인 증기가 포화상태로 운전되고 있다.<sup>(3)</sup>

이와 같이 화력발전용 터빈에서는 터빈 최종단 부근에서, 그리고 원자력발전용 터빈에서는 터빈 전단에 걸쳐, 초음속 흐름이되며, 비평형과정의 응축이 일어나기 때문에, 익렬유동은 엔트로피의 급격한 증가가 수반되고, 압축파, 팽창파, 내부 후연충격파(inner edge shock wave)와 외부 후연충격파(outer edge shock wave) 즉, 경사충격파가 동시에 발생하며, 습증기의 건도(quality)가 낮은 경우에 응축충격파도 수반되게 된다.<sup>(4)</sup> 또한, 비평형과정의 응축으로부터 발생된 水滴에 의한 동익의 침식과 효율저하(습손실 : wetness loss) 등<sup>(5,6)</sup>의 습증기 특유의 문제가 증기터빈의 익렬유동에서 발생한다.

최근, 전력수요의 증가에 따른 원자력발전 터빈의 건설의 증가와 화력발전의 경우에 효율의 관점에서부터 터빈이 점차 대형화되는 이유때문에 동익내 습증기의 유동에 대한 연구의 중요성이 점차 증대되고 있는 실정이다. 즉, 터빈의 효율을 향상시키기 위해 터빈 동익내의 초음속 습증기유동을 명확히 규명해야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 국내의 발전용 터빈으로 사용되고 있는 증기터빈 저압 최종단(저압단은 6단으로 구성되어 있음)의 동익先端의 단면을 2

차원화한 증기터빈 익렬내의 유동에 대하여 작동유체로서 수증기와 거동이 유사한 습공기를 사용하여 실험을 통하여 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

증기터빈의 저압 최종단 익렬의 선단(tip)에서의 유동마하수는 약 0.7~2.0이다.<sup>(3)</sup> 상기의 소요마하수를 얻기 위하여 본 실험에서는 대기 흡입식 초음속 풍동을 이용하였다.<sup>(7)</sup>

실험에 사용한 동익의 형상은 現用의 증기터빈 저압 최종단 동익선단 부분의 단면을 wire cutting에 의해 2차원으로 가공한 것이다. 동익이 장착된 측정부의 기하학적 상세도는 Fig. 1과 같으며, 이는 현재 사용되고 있는 증기터빈의 저압 최종단의 동익선단에 대한 기하학적 형상과 증기의 입구 및 출구조건 등으로부터 구한 것이다. 측정부는 폭이 25 mm이고 높이가 82 mm인 4각 덕트이며, 그 재질은 듀랄루민이다. 이 덕트내에는 3장의 동익으로 구성되는 유동장(측정부)이 실재 증기터빈 동익내의 유동장과 기하학적 형상이 동일하게 되도록 동익입구각( $\beta=160.09^\circ$ ), 동익원주피치(100 mm  $\approx \sqrt{96^2+27^2}$ ) 등을 고려하여 제작되었다. 이때, Fig. 1과 동일한 유동장은 2조를 만들었다. 즉, 유동장의 흐름을 가시화하기 위한 측정부 1조가 4각 덕트의 양측벽에 두께가 10 mm인 광학유리로 구성되어 제작되었고, 다른 측정부 1조는 익 표면에서의 정압을 측정하기 위한 것으로 듀랄루민만으로 4각 덕트로 제작하였다.

익렬내 유동을 가시화하기 위하여 본 연구에서 사용한 가시화기법은 슈리렌법이다. Fig. 1에 나타

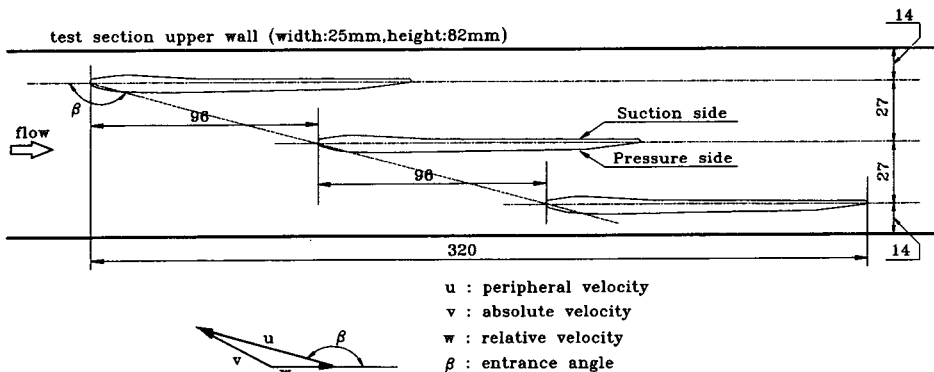


Fig. 1 Specification of test section

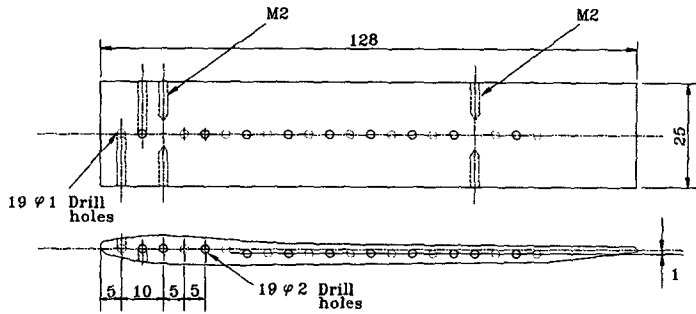


Fig. 2 Detail of blade to measure static pressure at suction and pressure sides

난 바와 같은 익의腹面 (pressure side)과 背面 (suction side)부의 정압은 터빈익의 상하벽면에 정압공을 통하여 수은마노미터로 측정하였다. 여기서 터빈익에 뚫은 정압공의 위치는 Fig. 2와 같고, 정압공의 직경은 유동에 정압공이 영향을 미치는 것을 고려하여 1mm로 하였으며 측벽에서 정압공까지는 직경 2mm로 뚫었다. 한편, 3장의 동익은 4개의 나사(M2)로 덕트의 양측벽 사이에 고정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 정체점온도  $T_0=299\text{ K}$ , 정체점 상대습도  $\phi_0=36\%$ 인 경우에 대한 슈리렌 가시화사진과 측정된 정압분포를 사용하여 이 유동장을 도식적으로 나타낸 것이다.

익 후연으로부터 발생하는 경사충격파가 덕트의 상부벽에 입사한 후 재반사함으로써 야기되는 현상은 실제의 터빈 동익내 유동에서는 일어나지 않으므로, 본 연구에서는 익의 복면과 배면에 있어서의 실제의 정압을 구하기 위하여 중간익 전후의 익에 대한 정압을 구하여 사용하였다.

익의 後緣에서는, 마하수가 다른 익의 배면흐름과 복면흐름이 서로 만나고 또한 재료강도에 기인된 후연의 기하학적 형상으로 인하여 후류가 발생되고 있고 발생된 후류때문에, 그림의 상세도에 나타난 바와 같이 압축파가 형성되어 경사충격파(oblique shock wave)가 발생되고 있다. 한편, 복면 후연에서 발생된 경사충격파는 후방에 위치한 동익의 배면에 입사한 후 정상반사(regular reflection)되고 있다.

따라서 재료의 강도가 허락하는 한, 동익 배면흐름과 복면흐름이 익 후면에서 부드럽게(smooth)

만나도록 하면 후류의 발생의 억제되고, 이로 인하여 엔트로피의 증가가 수반되는 비가역과정인 경사충격파의 충격파강도(shock strength= $(p_2-p_1)/p_1$ ) 여기서,  $p_1, p_2$ 는 각각 경사충격파 직전과 직후의 정압)가 감소되므로써 터빈의 효율을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

동익 복면에 있어서 동익 선단으로부터 중심선(camberline)을 따른 거리  $x$ 를 익현장 길이  $L$ 로 무차원화 한  $x/L=0.80$ 와 배면  $x/L=0.10$ 에 걸쳐서는 흐름이 초킹되는 위치가 존재하며, 복면  $x/L=0.84$ 의 위치에는 반동도를 높이기 위해 동익을 경사지게 잘라낸 부분으로부터 팽창파가 발생되고 있음도 알 수 있다.

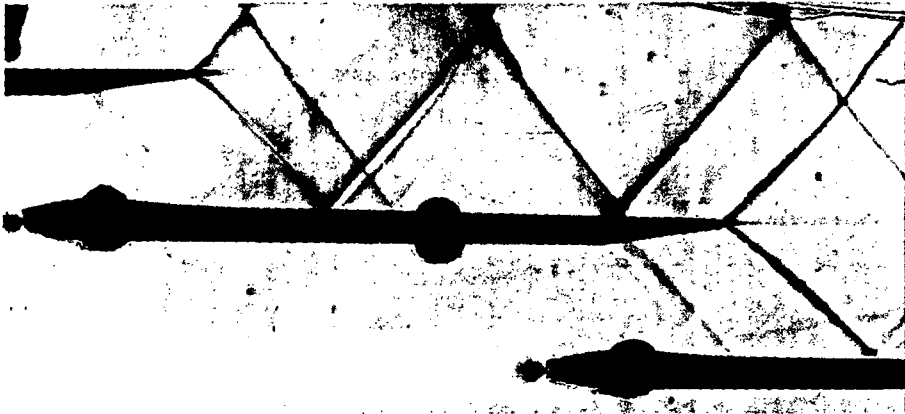
Fig. 4는 정체점온도  $T_0=294\text{ K}$ , 상대습도  $\phi_0=40\%$ 인 경우에 대한 슈리렌사진과 동익의 배면과 복면에서 수은마노미터로 측정된 정압을 정체점압력  $p_0$ 로 무차원화한 정압분포와 무차원 정압분포로부터 구한 마하수분포를 나타낸 것이다.

이때, 측정된 정압과 마하수의 관계는 흐름이 등엔트로피 과정인 것으로 가정하여 다음식에 의하여 구했으며, 이 경우 습공기의 비열비는 공기와 수증기의 질량비를 고려하여 구하였다.

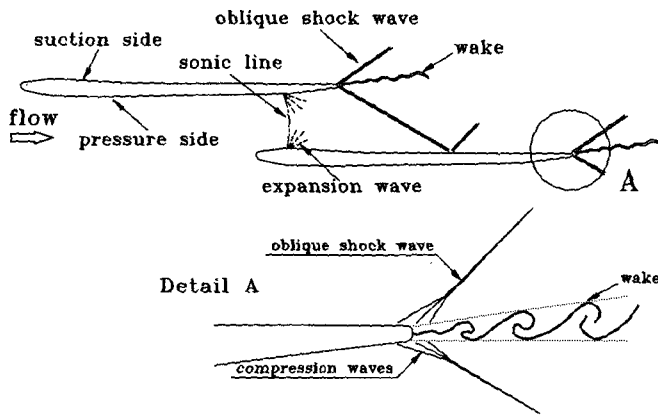
$$\frac{p}{p_0} = \left\{ \frac{1}{1 + \left[ \frac{(k-1)}{2} \right] M^2} \right\}^{\frac{k}{k-1}}$$

여기서,  $p_0$ 는 정체점 압력이고  $M_f$ 는 동결마하수이다.

먼저, 익 배면에 있어서의 정압분포를 보면, 아음속인 흐름이 전연에 유입한 후 전방익의 복면과 전연의 배면이 이루는 유로의 면적의 감소에 따른 효과 때문에 팽창하여  $x/L=0.04$  부근에서 음속에 도달하고 팽창은  $x/L=0.20$ 까지 계속된다. 특히,



(a) Schlieren photograph



(b) Schematic of flow field<sup>(6)</sup>

Fig. 3 Schlieren photograph and schematic of flow field

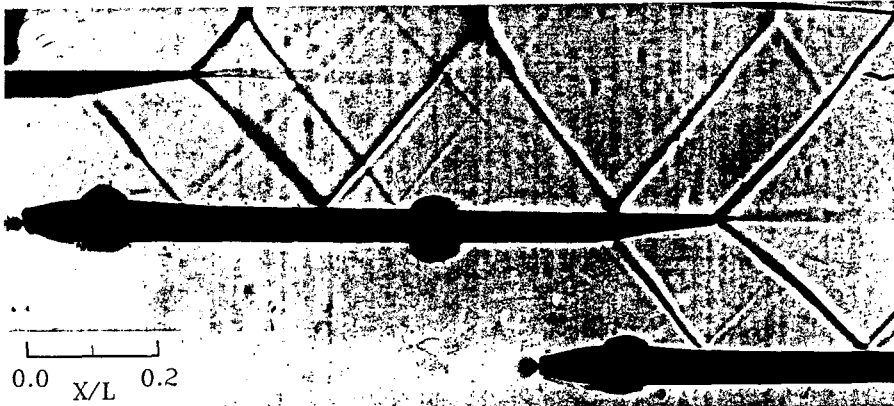
$x/L=0.03\sim 0.40$ 사이에서는 전방의 경사부분으로부터 발생된 Prandtl-Meyer 팽창파가 입사됨으로써 압력이 급격히 감소되고, 익 후면으로부터 발생된 경사충격파가 입사되는  $x/L=0.42$ 부근에서는 압력의 급격한 증가가 일어남을 알 수 있다.

한편, 익 복면에서의 정압은 익의 전연으로부터 다음 익의 전연이 위치하는  $x/L=0\sim 0.75$ 까지는 거의 일정하다가  $x/L=0.75$ 부터 감소하기 시작하여 익 복면을 경사지게 잘라낸 경사부분부터 급격한 감소가 일어남을 보이고 있다. 측정된 정압으로부터 구한 마하수분포를 나타내는 (c)에서는 정압 분포의 경우와 반대의 현상이 일어남을 알 수 있다.

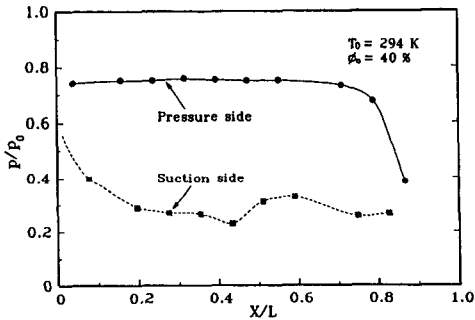
Fig. 5는 정체점 상대습도  $\phi_0=40\%$  경우에 대한 정체점 온도  $T_0$ 의 변화가 익의 배면에 있어서의 정

압분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림중 기호 ●, ■는 각각  $T_0=294, 299\text{K}$ 에 대한 것이다.

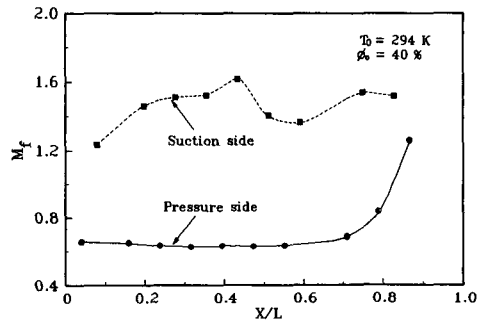
무차원 정압  $p/p_0$ 가 0.45 이하인 것으로부터 배면에서의 유동은 전체적으로 초음속임을 알 수 있다. 무차원 압력분포 양상은  $T_0$ 에 관계없이 전체적으로 유사한 경향을 보이고 있으나, 동일한  $\phi_0$ 인 경우에 대해서는 정체점 온도  $T_0$ 가 높을수록 정압은 커지게 됨을 알 수 있다. 이는 동일한  $\phi_0$ 인 경우에 대해서는  $T_0$ 가 높을수록 정체점에 있어서의 수증기의 질량비 즉, 비습도(specific humidity)가 크게 되고, 이로 인한 비평형과정의 응축(nonequilibrium condensation)에 의한 응축량이 많아지고, 그에 따른 잠열의 방출량이 많아지게 되어 가열에 의해 흐름이 크게 감소되기 때문이라고 생각된다.



(a) Schlieren photograph



(b) Pressure distribution



(c) Mach number distribution

Fig. 4 Schlieren photograph and distributions of pressure and Mach number at pressure and suction sides ( $T_0=294\text{K}$  and  $\phi_0=40\%$ )

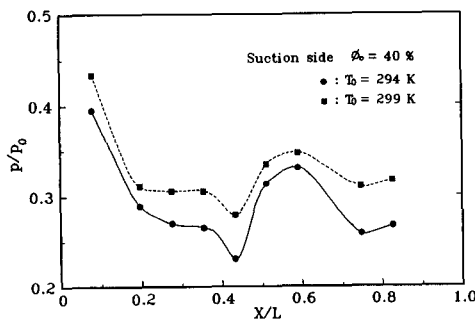


Fig. 5 Effect of stagnation temperature on pressure distributions at suction side of blade ( $\phi_0=40\%$ )

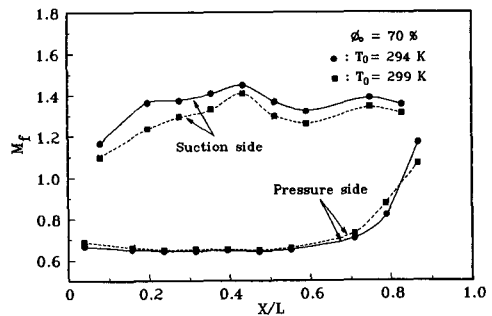


Fig. 6 Effect of stagnation temperature on distributions of Mach number at suction and pressure sides of blade ( $\phi_0=70\%$ )

Fig. 6은 정체점 상대습도  $\phi_0=70\%$ 인 경우에 대한, 익의 배면과 복면에 있어서 정체점온도  $T_0$ 가 마하수분포와 정압분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

여기서도 마하수분포는 측정된 정압으로부터 구하였다. 복면에 대해서 볼 것 같으면, 전체적인 마하수분포는 정체점온도  $T_0$ 에 관계없이 거의 유사한 경향을 보이고 있다.  $x/L=0$ 부터 0.65까지는

마하수가 0.67 정도로 거의 일정하게 유지되다가 후방익의 전연이 위치한 곳에서부터 두 동익의 기하학적 형상에 기인되는 팽창효과 때문에 마하수가 급격히 증가되어  $T_0=294\text{ K}$ 인 경우는  $x/L=0.85$ 에서 마하수가 1.2까지 팽창됨을 알 수 있다.

특히,  $x/L$ 이 0.83보다 작은 아음속인 영역에서는 동일한  $\phi_0$ 에 대해  $T_0$ 가 큰 299 K 경우가 294 K인 경우에 비해 마하수가 전체적으로 조금 높고,  $x/L$ 이 0.83보다 큰 초음속인 경우에는 반대의 현상이 나타나고 있다. 이는 동일한  $\phi_0$ 에 대해서는  $T_0$ 가 높을수록 초기 정체점에 있어서의 공기 증에 포함될 수 있는 수증기량이 크게 되고, 그에 따른 잠열의 방출이 커진 때문이라고 생각된다. 즉, 아음속인 경우는 흐름에 대한 가열량이 많으면 많을수록 마하수는 높아지고, 초음속인 경우는 가열량의 증가에 따라 마하수의 감소가 커지기 때문이라고 생각된다. 그러나, 마하수분포( $M_{f2}$ )가 초음속인 익 배면에 있어서는 동일한  $\phi_0$ 에 대해서  $T_0$ 가 높을수록 비평형과정의 응축에 따른 잠열 방출이 크게 되고 그에 따른 흐름의 가열이 크게 되어 동일한  $x/L$ 에 있어서 마하수는 낮게 되고 정압은 크게 된다.

Fig. 7은 정체점온도  $T_0=299\text{ K}$ 인 경우에 대해, 정체점 상대습도  $\phi_0$ 가 익의 배면과 복면에 있어서의 정압분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

양면에 있어서 정압분포의 양상은 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 익의 배면에 있어서는 정압분포가 동일한  $T_0$ 에 대해  $\phi_0$ 가 높은 70%인 경우가 40%인 경우에 비하여 높게 나타났으나 복면에 있어서는 반대의 현상이 나타났다.

이는 전술한 바와 같이, 동일한  $T_0$ 에 대해서는

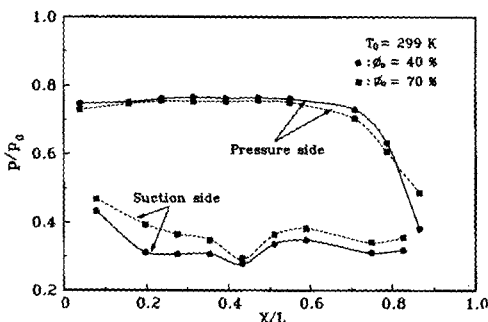


Fig. 7 Effect of stagnation relative humidity on distributions of pressure at both sides of suction and pressure ( $T_0=299\text{ K}$ )

$\phi_0$ 가 높을수록 초기 정체점에 있어서의 공기 증에 포함되는 수증기의 양이 많아지게 되기 때문이라고 생각된다. 즉, 정체점에 있어서의 비습도가 높을수록 동일한  $x/L$ 에 있어서 유동중 일어나는 비평형과정의 응축에 의해 응축량이 많아지고(응축에 의한 잠열의 방출량이 많아지고), 이에 따라 유동이 초음속인 배면에서는  $\phi_0$ 가 높을수록 정압이 높게 되고, 아음속인 익의 복면에서는 반대의 현상이 나타난다고 생각된다.

한편, 익의 복면의 경우에  $x/L=0.83$  부근에서부터는 복면유동이 초음속으로 되기 때문에  $\phi_0$ 가 낮은 40%인 경우가 높은 70%인 경우에 비하여 비평형 과정의 응축에 의한 유동의 가열효과가 적게 되어 정압이 급격히 감소되어 가속되고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

현재 국내의 발전용 터빈으로 사용되고 있는 증기터빈 저압 최종단의 동익선단의 단면을 2차원화한 유동장에 대하여 실험한 결과에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 익의 복면에 대하여, 동일한  $\phi_0$ 인 경우에는  $T_0$ 가 높을수록 정압의 크기는 크게 된다.
- (2)  $\phi_0=70\%$ ,  $T_0=294\text{ K}$ ,  $299\text{ K}$ 인 경우 익 복면에 있어서 익의 전연으로부터의 거리  $x/L$ 가 0.83까지는 아음속이고 그 이후는 초음속이다.
- (3) 측정된 정압분포와 슈리렌사진으로부터 측정된 결과는 서로 잘 일치함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국기계연구원의 위탁에 의하여 수행하였으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 池田隆, 永島俊三郎譯, 1982, “蒸氣タービン,” ミチエクリヤエフ, トロヤノフスキ-著, 三寶社.
- (2) Maiorskii, E. V. and Troyanovskii, B. M., 1965, “An Experimental Study of Supersonic Flow in Turbine Cascades,” *Teploenergetika*, 12 (12), 69-72, p. 93.
- (3) Moore, M. J. and Sieverding, C. H., 1976

*Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators*, McGraw-Hill.

- (4) Troyanovskii, B. M., 1977, "Supersonic Cascade in the Last Stage of High-Capacity Steam Turbine," *Teploenergetika*, 124(10).
- (5) 秋葉, 川岩, 機論 51-469, B(昭60).
- (6) 蒸氣タービン, ターボ 機械協會編, 1990, 日本工業出版社.
- (7) 김병지, 권순범, 강창수, 이은수, 1990, "膨脹率이 一定한 超音速 노즐흐름의 凝縮開始에 관한 研究," 大韓機械學會論文集, 第14卷 第2號, p. 463.
- (8) Lehthaus, F. and Lawaczeck, O., 1978, "Untersuchungen Über die Transsonische Strömung Durch Turbinen-Schaufelgitter," VDI-Forschungsheft, p. 586.