입사각이 고선회 터빈 동익 하류에서의 3차원 유동 및 압력손실에 미치는 영향

채병주* · 이상우†

Effects of Incidence Angle on the Three-Dimensional Flow and Aerodynamic Loss Downstream of a High-Turning Turbine Rotor Blade

Sang Woo Lee and Byoung Joo Chae

Key Words: Incidence Angle (입사각), Off-Design Condition (탈설계점), High-Turning Turbine Rotor Blade (고선회 터빈동익), Aerodynamic Loss (압력손실)

Abstract

The effect of incidence angle on the three-dimensional flow and aerodynamic loss in the downstream region of a high-turning turbine rotor blade has been investigated with a straight miniature five-hole probe. The incidence angle is changed to be +10, +5, 0, -10, -20, -30 and -40 degrees. The results show that the positive incidence reinforces the three-dimensional vortical flows within the turbine passage including the passage vortex, but the negative incidence weaken them significantly. A small increment in the positive incidence angle results in a remarkable aerodynamic loss increase, while increasing the incidence angle in the negative range leads to a very small change in the aerodynamic loss.

기호설명

b	: 축방향 코드길이
c	: 코드길이
i	: 입사각
p	: 피치
s	: 스팬
xyz	: 익렬 좌표계, Fig. 2
y_m	: 측정위치에서 피치방향 좌표, Fig. 2
ν	: 동점성계수
ρ	: 밀도

† 정회원, 금오공과대학교 기계공학부
E-mail : swlee@kumoh.ac.kr
TEL : (054)478-7296 FAX : (054)478-7319
* 회원, 금오공과대학교 대학원

1. 서 론

가스터빈 엔진에서 터빈(turbine)의 효율은 각 단(stage)에서의 압력손실과 밀접한 관련이 있다. 특히 케이싱(casing)에 고정된 정익(stator vane)과는 달리 터빈 동익(rotor blade)은 그 자체의 회전 속도의 변화에 의해서 넓은 입사각(incidence angle) 범위에서 작동하게 된다. 따라서 이 입사각은 탈설계점(off-design condition)에서 작동하는 터빈의 성능에 영향을 주는 가장 중요한 파라미터 중 하나이다.

Hodson과 Dominy[1]는 탈설계점에서 저압터빈(low-pressure turbine) 익렬에서의 유동가시화 및 통로유동 측정 실험을 수행하였다. 그 결과 입사각이 -20도에서 8.6도로 변화함에 따라, 끝벽 근처 저운동량 유체가 익형 흡입면 위로 더 강하게 이동하였다. Yamamoto와 Nouse[2]는 입사각이 익열 통로내 3차원 유동과 압력손실에 미치는 영향

에 대하여 연구하였다. 그들은 익렬 선회각이 113.3도이고 코드길이에 비해 앞전과 뒷전의 직경이 비교적 큰 터빈 익형에 대하여, 입사각을 7.2도에서 -53.3도까지 변화시켰다. 그 결과, 그 입사각이 증가할수록(+), 익렬 입구에서의 부하(loading) 증가로 인해 끝벽 저에너지 유체의 압력면으로의 이동이 증가하였다. 입사각이 감소할수록(-), 익렬 입구의 부하는 감소하고 흐름의 이차원화가 진행되었다. Jouini 등[3]은 탈설계점 상태의 천음속 터빈 익렬에 대해 미드스팬에서의 유동 및 압력손실을 측정하였다. 그들은 입사각을 +14.5도에서 -10도까지 변화시키면서 평면손실(profile loss)를 제시하였다. 그 결과 평면손실은 기본 압력의 거동과 밀접한 관련이 있었다.

본 연구에서는 최신 고선회각 고압터빈 동익 익형에 대하여, 입사각이 그 하류에서의 3차원 유동 및 압력손실에 미치는 영향을 체계적으로 연구하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 익렬풍동은 Fig. 1에서와 같이 개방형 풍동, 입구덕트, 터빈 익렬 등으로 구성된다. 개방형 풍동은 면적축소비가 9.0이고, 인버터에 의해 최대 40 m/s까지 출구 유속의 조절이 가능하다. 이 개방형 풍동을 통과한 균일 유동은 익렬 상류에 위치한 입구덕트로 유입된다. 이 입구덕트의 단면은 420 mm × 320 mm이고, 폭방향 중심에서 그 길이는 1.2 m이다. 입구덕트 하류에 설치된 터빈 익렬에는 여러 개의 선형 익형들이 설치되어 있다. 이것은 산업용 가스터빈의 터빈 제 1 단 동익의 미드스팬 형상을 근거로 large-scale로 제작되었다.[4] Fig. 2는 본 연구에서 사용된 익형의 상세도를 보여 준다. 이 익형의 코드길이(c), 피치(p), 스팬(s) 등은 각각 217.8 mm, 151.6 mm, 320.0 mm 등이고, 선회각은 119도이다. 이 익렬은 입사각의 조절이 가능한 테이블 위에 위치한다. 입사각은 Fig. 2에서와 같이 정의되며, Fig. 1에서 테이블이 (+)방향으로 회전하면 입사각이 양이 되고, (-)방향으로 회전하면 음이 된다.

2.2 실험방법

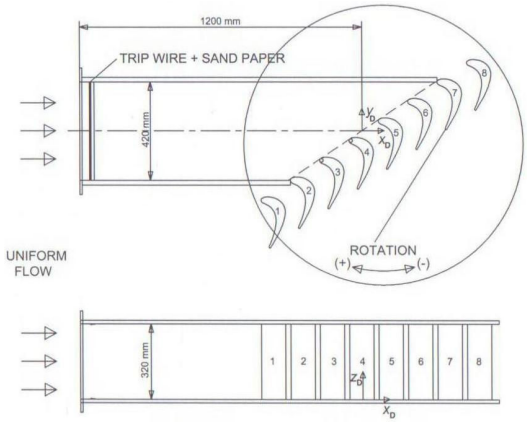


Fig. 1 Overall view of cascade wind tunnel

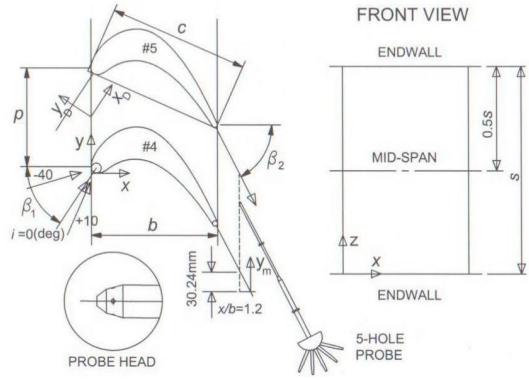


Fig. 2 Turbine rotor cascade

본 연구에서는 펜티엄-4 PC로 전체 측정시스템을 온라인화 하였으며, 이를 위해 A-D변환기(NI, PCI-MIO-16E-4)와 DI/O보드(NI, PCI-6503)가 컴퓨터에 내장되어 있다. 압력변환기 (MKS, 223BD-00010ACB)에 의해 변환된 압력신호는 12비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 본 연구에서는 프로우브의 정밀한 이송을 위해 3차원 자동이송장치를 사용하였다.

3차원유동 및 압력의 손실을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 지지대 형태가 직선인 2단 원추형 5공프로우브를 사용하였다. 이 5공프로우브는 미국 United Sensors 사에 특별한 사양으로 주문, 제작되었다. 이 5공프로우브의 앞전 직경은 3.2 mm이고, 프로우브 지지대는 6.4mm로 보강되어 있다. 본 실험에서는 프로우브고정법(non-nulling method)을 적용하여 5공프로우브를 보정하였다.[5] 5공프로우브의 5개의 압력을 순차적으로 측정하기 위하여 압력스캐너(Furness Controls, FC091-MKII)를 사용하였고, 이 압력스캐너도

DI/O보드를 이용하여 제어하였다.

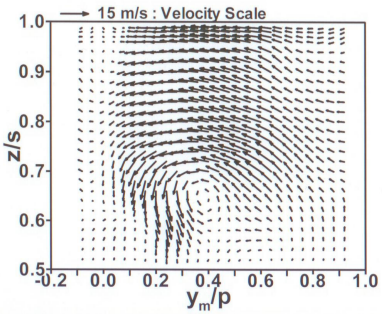
2.3 실험조건

Yamamoto와 Nouse[2]와 같이, 익렬 출구 하류에서의 질량평균 유속 U_e을 16.4m/s로 고정하고 실험을 수행하였고, 이 하류 유속과 코드길이를 기준으로 한 Reynolds 수(Re=$U_e c/\nu$)는 2.29×10^5이었다. 본 연구에서는 입사각이 +10도, +5도, 0도, -10도, -20도, -30도, -40도 등 총 7경우에 대해 실험을 수행하였고, 이들 각 입사각에서 입구자유유동속도에 대한 출구평균유속의 비 U_∞/U_e는 각각 1.150, 0.962, 0.832, 0.668, 0.572, 0.514, 0.480, 0.463 등이었다. 3차원유동의 측정은 익렬 하류인 x/b = 1.2에서 이루어졌고, Fig. 2의 좌측 그림에서 점선으로 표시된 부분이 피치방향으로 실제 측정이 이루어진 범위를 나타낸다. 스팬방향으로는 미드스팬(z/s = 0.5)에서 끝벽(z/s = 1.0) 사이에서 측정이 이루어졌다.

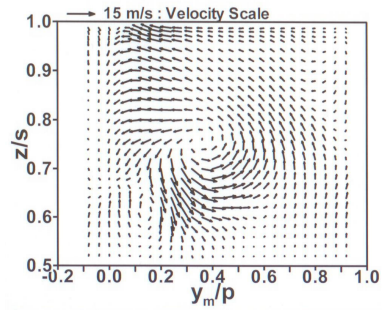
3. 결과 및 검토

3.1 3차원 유동장

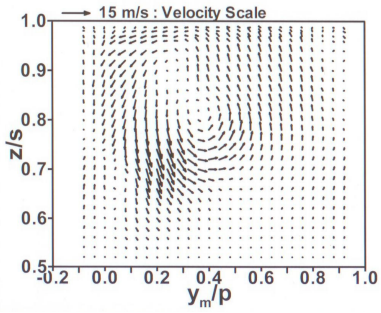
Fig. 3은 측정평면 즉 x/b = 1.2에서 이차유동 속도벡터를 그린 것이다. 이 속도벡터는 각 측정 위치에서의 y- 및 z-축 유속을 미드스팬의 값으로 뺀 후 그린 것이다. 설계점(i = 0도)(Fig. 3(c))에서의 결과를 보면, 측정 단면 중심부 근처에는 반시계방향으로 회전하는 통로와류(passage vortex)가 존재한다. 이 통로와류는 익형 앞전에서 생성된 말발굽와류(horseshoe vortex)의 압력면다리(pressure-side leg)가 발달하여 형성된 것으로 터빈 통로 내부에서 발생하는 가장 강한 와류이다. 입사각이 0도에서 +5도로 변화하면, 이 통로와류는 더 강해지는 경향을 보이며, 그 와류 중심은 미드스팬 쪽으로 이동하였다. 입사각이 (+) 방향으로 더 증가하여 +10도에 이르면 통로와류는 대부분의 터빈 통로에 영향을 줄 정도로 강력해지고, 와류의 위치는 한층 더 미드스팬에 근접하였다. 이와는 달리 입사각이 설계점으로부터 (-)방향으로 증가하면, 통로와류의 강도는 급속히 약화되고, 와류의 영역도 끝벽 근처로 제한되는 경향을 보인다. 이 사실은 (-)입사각은 터빈 통로 내부에서 발생하는 3차원 와류들의 성장을 억제함을 의미한다.



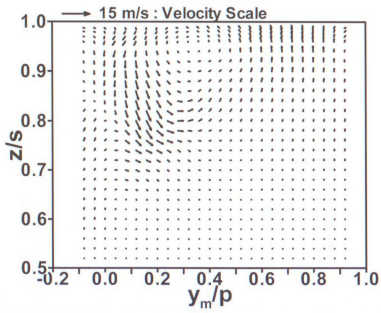
(a) i = +10 deg



(b) i = +5 deg



(c) i = 0 deg



(d) i = -20 deg

Fig. 3 Velocity vectors in the y_m-z plane

3.2 압력손실계수의 정의

압력손실은 다음과 같이 전압력손실계수(total-pressure loss coefficient)의 형태로 정의된다.

$$C_{pt} = \frac{P_{t,0} - P_t}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \qquad (1)$$

이 식에서 $P_{t,0}$는 입구 덕트에서의 기준 전압력을 나타내고, P_t는 측정 위치에서 얻은 국소 전압력을 나타낸다. 스팬방향 즉 z-축 방향으로의 압력손실 분포를 이해하기 위해서는 피치방향으로 질량 평균된 전압력손실계수가 매우 유용하다. 이 피치방향 질량평균 전압력손실계수 (pitchwise mass-averaged total-pressure loss coefficient)는 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{C}_{pt,z} = \frac{\int_0^p \rho U C_{pt} dy_m}{\int_0^p \rho U dy_m} \tag{2}$$

측정 영역 전체에 걸쳐 질량평균된 전압력손실계수는 다음의 식으로 정의될 수 있다.

$$\overline{C}_{pt} = \frac{\int_0^p \int_{0.5s}^s \rho U C_{pt} dz dy_m}{\int_0^p \int_{0.5s}^s \rho U dz dy_m} \tag{3}$$

따라서 이 두 질량평균 압력손실계수 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\overline{C}_{pt} = \int_{0.5s}^s \overline{C}_{pt,z} dz \tag{4}$$

일반적으로 익렬 출구에서의 압력손실은 익형 경계층 및 뒷전 박리에 의해 발생하는 질량평균 형상손실계수(mass-averaged profile loss coefficient) $(\overline{C}_{pt})_P$와 익렬 통로에서의 이차유동에 의해 발생하는 질량평균 이차손실계수 (mass-averaged secondary loss coefficient) $(\overline{C}_{pt})_S$의 합으로 표시될 수 있다. 이때 질량평균 형상손실계수는 미드스팬에서 피치방향으로 질량평균된 압력손실과 동일하다.

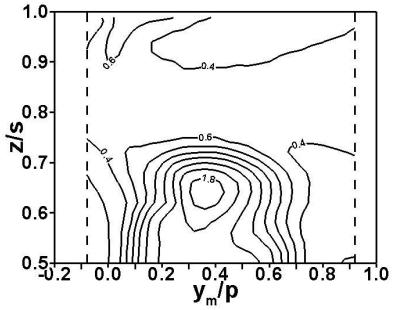
$$\left(\overline{C}_{pt}\right)_P = \overline{C}_{pt,z=0.5s} = \frac{\int_0^p (\rho U C_{pt})_{z=0.5s} dy_m}{\int_0^p (\rho U)_{z=0.5s} dy_m} \tag{5}$$

마지막으로 질량평균 이차손실계수는 다음의 식으로 구해질 수 있다.

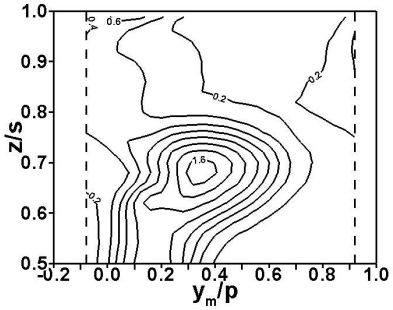
$$\left(\overline{C}_{pt}\right)_S = \overline{C}_{pt} - \left(\overline{C}_{pt}\right)_P \tag{6}$$

3.3 압력손실계수의 분포

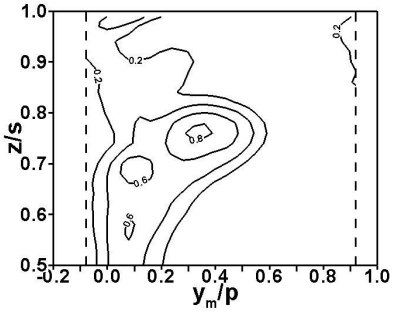
Fig. 4는 측정평면에서 입사각의 변화에 따른 전압력손실계수 $\overline{C}_{pt}$의 분포를 나타낸다. 설계점에서의 압력손실계수 분포를 보면(Fig. 4(c)), 미드스팬 근처에서 압력손실이 크게 나타나는데 이것은 주로 익형표면에서의 경계층의 성장과 뒷전 박리로 인해 발생하는 형상손실이며 이에 따라 미드스팬 영역에서의 $\overline{C}_{pt}$ 분포는 거의 z-축과 평행하게 나타난다. 그러나 z/s = 1.0(허브) 근처로 접근



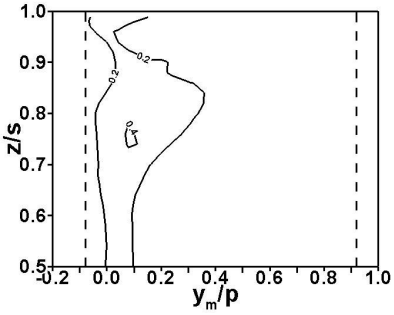
(a) i = +10 deg



(b) i = +5 deg



(c) i = 0 deg



(d) i = -20 deg

Fig. 4 Contour of $\overline{C}_{pt}$ in the y_m-z plane

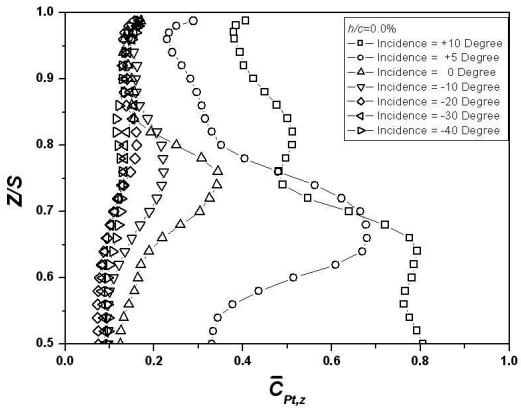


Fig. 5 Profiles of $\overline{C}_{pt,z}$ at x/b = 1.2

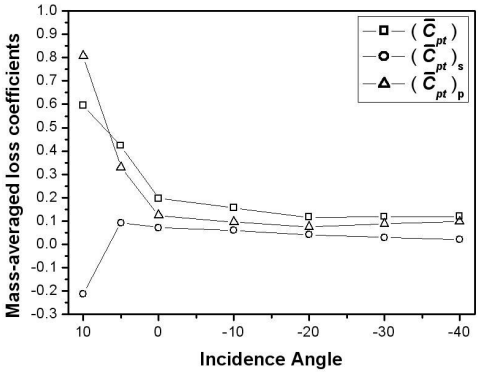


Fig. 6 Mass-averaged total pressure loss coefficients as a function of i at x/b = 1.2

할수록 끝벽 면에서 발달하는 이차유동의 영향으로 이와 같은 손실 분포가 크게 달라진다. 특히 z/s가 0.75 근처에서 존재하는 $\overline{C}_{pt}$의 최대값은 통로와류에 의해 발생한 것이다. 입사각이 +5도로 증가하면 설계점에 비하여 미드스팬 및 통로와류 중심 근처에서 $\overline{C}_{pt}$의 구배는 훨씬 커지고, 통로와류 중심 근처에서 나타나는 $\overline{C}_{pt}$의 최대치는 2.0에 이를 정도로 압력손실이 증가하였다. 입사각이 +10도로 되면 이와 같은 경향은 더 심화되어 미드스팬부터 z/s = 0.7 사이 영역에서는 거의 모든 곳에서 압력손실이 크게 발생하였다. 이와는 달리 끝벽 근처(z/s = 1.0)에서는 압력손실이 오히려 작게 나타났지만, 이 영역의 $\overline{C}_{pt}$ 값도 설계점에서 압력손실이 큰 영역에서의 $\overline{C}_{pt}$에 비하면 큰 값에 해당한다. 이와는 달리 설계점에서 입사각이 (-)로 되면 $\overline{C}_{pt}$의 값 및 그 구배는 크게 줄어 들었다.

Fig. 5는 식 (2)와 같이 정의된 피치방향 질량평균 전압력손실계수 $\overline{C}_{pt,z}$의 분포를 나타낸다. 전체적으로 $\overline{C}_{pt,z}$ 분포를 보면 입사각에 따라 그 값이 매우 크게 변화함을 확인 할 수 있다. 설계점에서는 통로와류가 존재하는 z/s = 0.75 근처에서 $\overline{C}_{pt,z}$가 최대값을 갖고 끝벽 또는 미드스팬으로 이동할수록 $\overline{C}_{pt,z}$는 서서히 감소하는 경향을 보인다. 입사각이 -10도일 경우에도 설계점과 흡사한 $\overline{C}_{pt,z}$ 분포가 나타나지만 그 최대치는 더 작아진다. 입사각이 -10도, -20도, -40도로 변화하면 $\overline{C}_{pt,z}$는 대체로 감소하는 경향을 보여 준다. 이와는 달리 입사각이 +5도, +10도일 경우 $\overline{C}_{pt,z}$는 매우 큰 폭으로 증가한다. 입사각이 +5도일 경우에는 $\overline{C}_{pt,z}$의 최대치가 0.7 근처에 존재하는 등 대체로 설계점에서의 $\overline{C}_{pt,z}$분포와 비슷한 경향을 보여 주었지만, 미드스팬에서의 $\overline{C}_{pt,z}$ 즉 형상손실계수 $(\overline{C}_{pt})_P$는 설계점에 비하여 매우 크게 나타났다. 특히 입사각이 +10도에서는 이 미드스팬에서의 $\overline{C}_{pt,z}$ 즉 $(\overline{C}_{pt})_P$가 스팬방향 전체에 걸쳐 가장 큰 값을 갖는다. 이 사실은 입사각이 +5도에서는 여전히 이차유동에 의한 $\overline{C}_{pt,z}$가 큰 값을 갖지만, 입사각이 +10도에서는 익형 경계층 특히 흡입면에서의 유동의 박리가 압력손실을 증가시키는 최대 요인임을 의미한다. 따라서 이 경우에는 식 (6)과 같이 정의되는 질량평균 이차손실계수 $(\overline{C}_{pt})_S$가 음의 값을 가질 수 있게 된다.

Fig. 6은 식 (3), (5), (6) 등으로부터 얻어진 $\overline{C}_{pt}$, $(\overline{C}_{pt})_P$, $(\overline{C}_{pt})_S$의 입사각에 따른 변화를 보여 준다. 질량평균전압력손실계수 $\overline{C}_{pt}$는 입사각이 +10도일 때 가장 크고, 입사각이 +5도, 0도로 변화하면 그 값이 급속히 감소한다. 이후 입사각이 -10도, -20도, -30도, -40도로 변화하여도 $\overline{C}_{pt}$의 변화는 매우 작았지만, 입사각이 -20도 이후에는 $\overline{C}_{pt}$가 조금이나마 다시 증가하는 경향을 보여 준다. 질량평균 형상손실계수 $(\overline{C}_{pt})_P$는 대체로 $\overline{C}_{pt}$와 비슷한 변화 경향을 나타내었지만, 입사각이 +10도에서는 $\overline{C}_{pt}$가 $(\overline{C}_{pt})_P$ 보다 더 커지는 현상이 관찰되었다. 이에 따라 입사각이 +10도에서는 질량평균이차손실계수$(\overline{C}_{pt})_S$가 음의 값을 갖게 된다. 이 경우를 제외하면 $(\overline{C}_{pt})_S$는 입사각에 관계없이 거의 일정하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 입사각이 고선회 터빈 통로 하류에서의 3차원유동 및 압력손실에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 입사각이 (+)방향으로 변화하면, 터빈 통로 내부의 이차유동의 발달이 촉진되었으나, (-)입사각에서는 터빈 통로 내부에서 발생하는 이차유동이 크게 약화되었다.

(2) 입사각이 (+)방향으로 증가하면 압력손실이 급격히 증가하였지만, 입사각이 (-)방향으로 변화할 경우 압력손실의 변화는 거의 없었다.

(3) 특히 입사각이 +10도일 경우, 질량평균 형상손실계수가 질량평균 전압력손실계수보다 더 커지는 기현상이 나타났다.

(4) 입사각 (+)일 경우 소량의 입사각의 증가도 유동 및 압력손실에 지대한 영향을 미쳤으나, 입사각이 (-)일 경우 입사각의 큰 변화에도 그 효과는 매우 작았다.

참고문헌

(1) Hudson, H. P., and Dominy, R. G., 1987, "The Off-Design Performance of a Low Pressure Turbine Cascade," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 109, pp. 201-209.

(2) Yamamoto, A., 1988, "Effects of Incidence Angle on Three-Dimensional Flows in a Linear Turbine Cascade," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 486-496.

(3) Jouini, D. B. M, Sjolander, S. A., and Moustapha, S. H., 2001, "Aerodynamic Performance of a Transonic Turbine Cascade at Off-Design Conditions," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 123, pp. 510-518.

(4) Jun, S. B., 2000, Measurements of Endwall Heat (Mass) Transfer Coefficient in a Linear Turbine Cascade Using Naphthalene Sublimation Technique, MS thesis, Kumoh National Institute of Technology.

(5) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, pp. 23-34.