

나프탈렌승화법을 이용한 터빈 익렬 끝벽에서의 열(물질)전달계수 측정

이상우[†] · 전상배^{*} · 박병규^{**}
(2000년 8월 7일 접수, 2001년 1월 8일 심사완료)

Measurements of Endwall Heat(Mass) Transfer Coefficient in a Linear Turbine Cascade Using Naphthalene Sublimation Technique

Sang Woo Lee, Sang Bae Jun and Byung Kyu Park

Key Words: Linear Turbine Cascade(선형 터빈 익렬), Endwall(끝벽), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법), Turbulent Intensity(난류강도), Heat(Mass) Transfer Coefficient(열(물질)전달계수)

Abstract

Heat (mass) transfer characteristics have been investigated on the endwall of a large-scale linear turbine cascade. Its profile is based on the mid-span of the first-stage rotor blade in a industrial gas turbine. By using the naphthalene sublimation technique, local heat (mass) transfer coefficients are measured for two different free-stream turbulence intensities of 1.3% and 4.7%. The results show that local heat (mass) transfer Stanton number is widely varied on the endwall, and its distribution depends strongly on the three-dimensional vortical flows such as horseshoe vortices, passage vortex, and corner vortices. From this experiment, severe heat loads are found on the endwall near the blade suction side as well as near the leading and trailing edges of the blade. In addition, the effect of the free-stream turbulence on the heat (mass) transfer is also discussed in detail.

기호설명

- c : 코드 길이(chord length)
- b : 축방향 코드 길이(axial chord length)
- C_p : 공기의 정적비열
- D : 공기중에서 나프탈렌의 물질확산계수 (mass diffusion coefficient), m^2/s
- h : 열전달계수
- h_m : 물질전달계수, m/s

- k : 공기의 열전도율
- \dot{m} : 단위면적 당 물질전달 또는 물질플럭스 (mass flux)
- Nu : 국소 Nusselt 수 = hc/k
- Pr : Prandtl 수 = $\nu/\alpha = \mu C_p/k$
- $P_{v,w}$: 벽면에서의 나프탈렌 증기압
- q : 단위면적 당 열전달률 또는 열플럭스 (heat flux)
- R : 나프탈렌의 기체상수 = $64.87 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- Re : Reynolds 수 = $U_\infty c/\nu$
- Sc : Schmidt 수 = ν/D
(나프탈렌의 $Sc \sim 2.28$)
- Sh : Sherwood 수 = $h_m c/D$
- St : 열전달의 Stanton 수 = $h/(\rho C_p U_\infty)$

[†] 책임저자, 회원, 금오공과대학교 기계공학부

Email : swlee@knut.kumoh.ac.kr

TEL : (054)467-4209 FAX : (054)467-4050

^{*} 회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과

^{**} 회원, 한국기계연구원 열유체환경연구부

- St_m : 물질전달의 Stanton 수 = h_m/U_∞
 δt : 나프탈렌이 유동장에 노출된 시간
 Ti : 자유유동의 난류강도 = u/U_∞
 T_w : 끝벽 벽면 온도
 T_∞ : 자유유동 온도
 U : x_c -축 방향의 속도
 U_∞ : 자유유동 속도
 u : 자유유동에서의 난류 섭동성분
 w : 입구덕트의 폭
 x, y, z : 블레이드의 좌표계, Fig. 3
 x_c, y_c, z_c : 실험장치의 좌표계, Fig. 1
 δz : 나프탈렌의 승화 깊이

그리스문자

- α : 공기의 열확산계수 = $k/(\rho C_p)$
 β_1 : 블레이드 입구각 = 56.4°
 β_2 : 블레이드 출구각 = -62.6°
 μ : 공기의 점성계수
 ν : 공기의 동점성계수
 ρ : 공기의 밀도
 ρ_s : 고체 나프탈렌의 밀도 = 1162 kg/m^3
 $\rho_{v,w}$: 벽면에서의 나프탈렌 증기농도
 $\rho_{v,\infty}$: 자유유동에서의 나프탈렌 증기농도

1. 서 론

가스터빈 엔진의 효율을 향상시키기 위해서는 터빈 입구온도(turbine inlet temperature)를 높여야 하며, 현재 터빈의 입구온도는 1500°C 에 이르고 있다. 이와 같이 높은 입구온도 때문에 고온의 gas와 접하는 터빈의 여러 구성 요소에 대한 냉각이 필수적이며, 이들 고온 부품에서의 정확한 열전달계수를 알아야 적절한 냉각시스템을 도입할 수 있다. 따라서 열전달계수는 터빈의 열시스템 설계에 있어서 매우 중요한 기초 데이터이다. 대부분의 가스터빈 엔진에서 블레이드 뿐만 아니라 끝벽(endwall)에서도 냉각이 이루어지고 있으며, 본 연구의 목적은 끝벽에서 정확한 열전달계수 데이터를 구하는 것이다. 터빈의 끝벽은 블레

이드 표면과 마찬가지로 연소기로부터 흘러오는 고온의 연소가스에 그대로 노출된다. 블레이드 끝벽 근처의 유동은 여러 종류의 와류들로 구성되는 매우 복잡한 3차원 유동이다.⁽¹⁾ 이와 같은 3차원 유동은 끝벽에서의 열전달계수 분포에 큰 영향을 준다. Blair⁽²⁾는 막냉각되는 터빈 끝벽에서 막냉각효율과 열전달계수를 측정하였고, Graziani 등⁽³⁾은 열전대와 스트립 히터를 사용하여 블레이드와 끝벽에서의 열전달에 대하여 연구하였다. York 등⁽⁴⁾은 고온 선형 익렬 풍동에서 열전대를 이용하여 끝벽에서의 열전달 특성을 연구하였다. Gaugler와 Russell⁽⁵⁾은 끝벽 근처 2차유동에 대한 가시화 결과와 측정된 열전달 분포를 비교하는 연구를 수행한 바 있다. Goldstein과 Spores⁽⁶⁾는 나프탈렌승화법(naphthalene sublimation technique)을 이용하여 끝벽에서의 국소 열(물질)전달계수를 측정하였다. 그들의 실험은 자유유동의 난류강도가 1.2%로 매우 낮은 상태에서만 이루어졌으며, 실험결과 기존의 다른 연구에 비해 매우 자세하고 정확한 열전달계수의 분포를 얻을 수 있었다. 국내에서도 이상우 등⁽⁷⁾을 시작으로 많은 열전달 연구^(8,9)에서 이 나프탈렌 승화법을 적용해 왔다.

본 연구의 목적은 산업용 가스터빈의 제 1 단동익 끝벽의 냉각시스템 설계를 위하여 끝벽에서의 열부하(heat load) 즉 열전달계수의 분포를 구하는 것이다. 이를 위하여 블레이드의 미드스팬(midspan) 형상으로 선형 터빈 익렬(cascade)을 제작하였고, 나프탈렌승화법을 적용하여 열(물질)전달계수를 측정하였다. 이와 함께 자유유동의 난류강도(turbulence intensity)가 끝벽 열전달에 미치는 영향에 대한 고찰도 이루어졌다.

2. 실험

2.1 나프탈렌 승화법

열전달의 연구에 있어서 열전달과 물질전달의 상사성(heat and mass transfer analogy)을 이용한 실험방법이 널리 이용되고 있다. 나프탈렌승화법은 그 중 한 방법으로 열전달계와 똑같은 기하학적 형상으로 나프탈렌을 주조하여 일정시간 유동장에 노출시킨 뒤, 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정하여 물질전달계수(mass transfer coefficient)를 구하고, 적절한 관계식을 이용하여 열전달계수(heat transfer coefficient)로 환산하는 방법이다.⁽¹⁰⁾

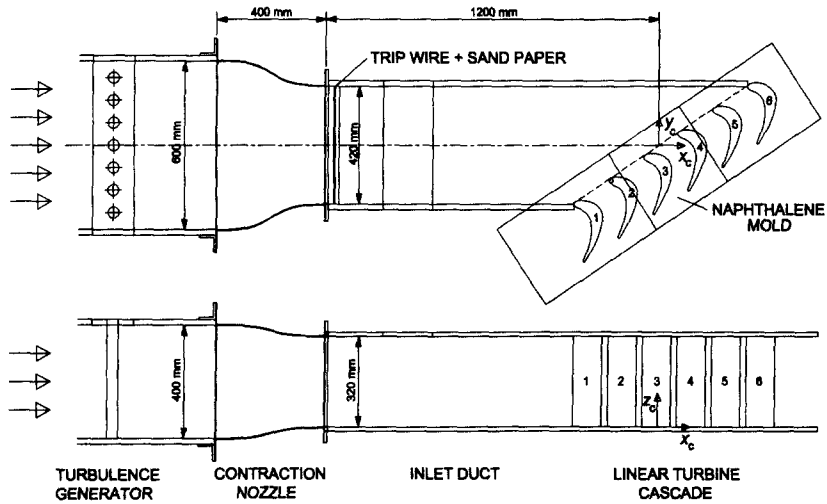


Fig. 1 Overall view of cascade wind tunnel

따라서 이 방법을 사용하면 열전달계(heat transfer system)에서의 실험 중 나타날 수 있는 여러 문제점을 비교적 쉽게 해결할 수 있다. 열전달계에서 일정한 온도로 유지되는 고체 표면에서의 열전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$q = h(T_w - T_\infty) \quad (1)$$

여기서 T_w 와 T_∞ 는 각각 벽면과 자유유동의 온도이고, h 는 열전달계수이다. 물질전달계(mass-transfer system)에서 나프탈렌 면에서의 표면온도가 일정하게 유지된다면, 그 곳에서의 나프탈렌의 증기압이 일정하므로 나프탈렌의 농도가 일정하다. 이와 같은 물질전달계의 등농도 조건은 열전달계에서는 등온조건에 해당된다. 일반적으로 물질전달계수 h_m 은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{m} = h_m(\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}) \quad (2)$$

이 식은 열전달계의 식 (1)과 대응된다. 여기서 $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 표면에서의 나프탈렌 증기의 농도이고, $\rho_{v,\infty}$ 는 자유유동에서 나프탈렌 증기의 농도이다. 그런데 이 유동장에서의 나프탈렌 농도 $\rho_{v,\infty}$ 는 0이므로, 물질전달계수는 다음과 같이 된다.

$$\dot{m} = h_m \rho_{v,w} \quad (3)$$

나프탈렌 표면에서의 \dot{m} 는 실험중 승화된 나프탈렌의 깊이 δz 를 측정함으로써 다음의 식으로 얻어진다.

$$\dot{m} = \rho_s \frac{\delta z}{\delta t} \quad (4)$$

여기서 ρ_s 는 고체 나프탈렌의 밀도이고, δt 는 유동장에 노출된 시간이다. 따라서 식 (3)과 식 (4)로부터 물질전달계수는 다음의 같이 구해진다.

$$h_m = \frac{\rho_s}{\rho_{v,w}} \frac{\delta y}{\delta t} = \frac{\rho_s}{P_{v,w}/RT_w} \frac{\delta y}{\delta t} \quad (5)$$

이 식에서 나프탈렌 벽면에서의 증기압 $P_{v,w}$ 는 벽면 온도에 매우 민감하므로, 이 벽면 온도에 직접적으로 영향을 주는 주유동의 온도를 일정하게 유지시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 Ambrose 등⁽¹¹⁾이 제안한 증기압 실험식을 사용하여 $P_{v,w}$ 를 구하였다. 일반적으로 Prandtl 수 Pr 과 Schmidt 수 Sc , 난류 Prandtl 수 Pr_t 와 난류 Schmidt 수 Sc_t 가 각각 서로 같고, 열전달계와 물질전달계의 경계조건이 서로 상사하다면, 열전달계와 물질전달계의 지배방정식이 서로 상사하게 된다. 따라서 이 경우 열전달계수와 물질전달계수가 서로 같게 된다. 난류유동에 있어서 Pr_t 와 Sc_t 가 서로 같음이 실험적으로 입증되었지만,⁽¹⁰⁾ 공기 중에서 확산되는 나프탈렌의 Sc 와 Pr 은 서

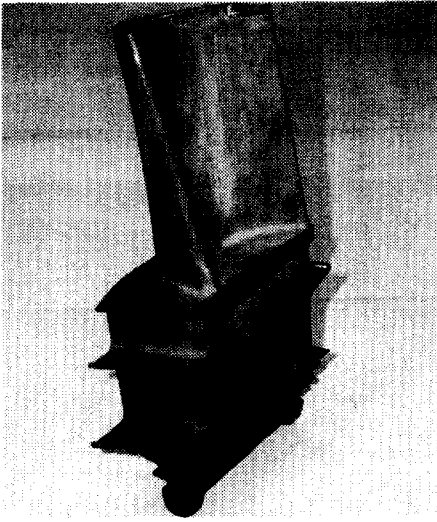


Fig. 2 The first-stage rotor blade in a industrial gas turbine

로 같은 값을 갖지 않으므로, Sherwood 수와 Nusselt 수는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n \quad (6)$$

만약 열전달과 물질전달이 Stanton 수의 형태로 무차원화된다면 다음의 식이 성립된다.

$$\frac{St}{St_m} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{n-1} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)에서 상수 n 은 대략 0.33 ~ 0.4 정도의 값을 갖는다.⁽⁶⁾ 식 (6)의 Sh 와 식 (7)의 St_m 은 다음과 같이 정의되는 무차원수이다.

$$Sh = \frac{h_m c}{D} \quad (8)$$

$$St_m = \frac{h_m}{U_\infty} = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} \quad (9)$$

식 (8)에서 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수인 D 는 온도와 압력의 함수이며 Goldstein과 Cho⁽¹⁰⁾에 그 관계식이 주어져 있다. 본 연구에서는 식 (9)의 형태로 물질전달계수를 무차원화하였다.

2.2 실험장치

본 연구에서 사용된 익렬 풍동(cascade wind tunnel)은 개방형 풍동, 원봉(bar grid)형 난류발생기, 수축부(contraction nozzle), 익렬 입구덕트, 익렬 등으로 구성된다(Fig. 1). 개방형 풍동은 면적축소비가 9.0이고, 출구의 단면은 600mm×400mm

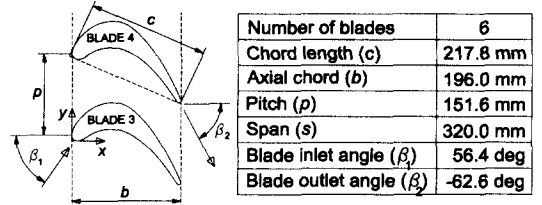


Fig. 3 Arrangement of turbine blade cascade

이다. 이 개방형 풍동의 출구에는 길이 1.8m의 사각덕트가 연결되어 있다. 이 사각덕트의 끝부분에 설치된 원봉형 난류발생기는 외경이 38mm인 스테인리스 스틸 파이프 7개로 이루어져 있고, 파이프 사이의 폭은 80mm이다. 이 난류발생기를 통과한 유동은 면적축소비가 1.8 정도로 비교적 작은 수축부를 지난 뒤, 익렬 입구덕트로 유입된다. 이 입구덕트의 단면은 420mm×320mm이고, 폭방향 중심에서의 길이는 1.2m이다. 이것의 입구 상하 벽에는 직경 2mm의 트립와이어와 사포(sand paper)가 차례로 부착되어 있어서, 상하벽 근처의 유동이 난류 경계층으로 발달된다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 익렬에는 총 6개의 선형 블레이드가 설치되어 있다. 이것은 Fig. 2와 같은 산업용 가스터빈의 터빈 제 1 단 동익의 미드스팬 형상을 근거로 large-scale로 제작되었고, 코드 길이 c 는 217.8mm이다. 이 선형 블레이드의 중요 제원은 Fig. 3과 같으며, 그 형상 좌표는 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 3번과 4번 블레이드에 의해 형성된 유로의 폭방향 중심을 x_c, y_c, z_c 좌표계의 원점으로 설정하였고, 하류방향을 x_c -축, 입구덕트의 폭방향을 y_c -축, 그리고 높이방향을 z_c -축으로 설정하였다. 그리고 Fig. 3과 같은 새로운 블레이드 좌표계 xyz 도 도입하였다.

본 연구에서는 IBM PC AT-486으로 온도, 경계층 속도, 난류 측정시스템을 온라인화하였으며, 이를 위해 다기능입출력보드 (National Instruments, AT-MIO-16D-H-9)가 컴퓨터에 내장되어 있다. 경계층 유동 측정시, 압력변환기(Furness Controls, FCO12)에 의해 변환된 압력신호는 다기능입출력보드의 12비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 프로우브의 정밀한 이송을 위해 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 이 장치는 세

Table 1 Turbine blade geometry

x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)
0	10.1834	117.0042	3.9683	125.9443	40.495
0.1906	7.9113	123.7588	-1.2099	120.0646	46.6472
0.7523	5.7644	130.2259	-6.7416	113.8846	52.499
1.7164	3.8481	136.4422	-12.5543	107.3188	57.9209
3.0903	2.2739	142.4389	-18.593	100.2683	62.6722
4.8493	1.1287	148.2358	-24.8244	96.5398	64.7196
6.8639	0.3954	153.8458	-31.2248	92.6857	66.5229
8.9917	0.0316	159.2673	-37.7856	88.7204	68.0635
11.1441	0	164.4993	-44.4986	84.6514	69.3008
13.2569	0.263	169.5676	-51.3352	80.4906	70.1996
15.3109	0.7793	179.3596	-65.2508	76.2729	70.7634
19.2287	2.4048	188.6603	-79.5116	72.0266	70.9844
22.9231	4.5555	189.6847	-80.609	67.7771	70.8691
29.956	9.34	191.045	-81.2812	63.5485	70.4328
37.2587	13.6914	192.5393	-81.3992	59.3589	69.7034
41.0767	15.5601	193.9596	-80.9595	55.2242	68.7091
44.9965	17.2017	195.1093	-80.0376	51.1574	67.4656
49.0088	18.6037	195.8481	-78.758	47.1704	65.9847
53.1008	19.7506	196.0614	-77.254	43.2753	64.2759
57.2583	20.6284	195.7215	-75.7782	35.808	60.2095
61.4647	21.2354	188.6374	-60.302	28.8387	55.3434
65.7028	21.5719	181.202	-44.9897	22.4041	49.7836
69.954	21.636	173.433	-29.8447	16.5025	43.6562
74.1989	21.4239	169.3938	-22.3534	11.0962	37.0849
78.4165	20.9264	165.2315	-14.9294	6.3869	30.0071
82.5879	20.1404	156.5483	-0.2896	4.367	26.2827
86.7056	19.0942	147.2176	13.9448	2.6863	22.5391
94.754	16.3416	142.2221	20.8348	1.4157	18.795
102.5005	12.8326	137.0059	27.5605	0.4643	14.7128
109.922	8.68	131.5833	34.1209	0	10.1834

축방향으로 컴퓨터에 의해 자동이송되는데, 각 이송축은 불나사와 직선운동가이드로 이루어진 직선유닛, 스테핑모터 및 스테핑모터 드라이버 등으로 구성되어 있다. 이 3차원 이송장치는 수평조절이 가능한 지지대에 탑재되어 있다. 스테핑모터는 전용 드라이버의 펄스입력을 통해서 제어되는데, 이 디지털 펄스는 다기능입출력보드로부터 공급된다. 입구 자유유동의 난류강도 Ti 를 측정하기 위해서 정온형 열선유속계(Kanomax, 1010)와 선형화기(Kanomax, 1013)를 사용하였다.

나프탈렌승화법을 적용하여 열전달을 연구하려면, 측정하고자 하는 영역이 열전달계와 동일한 형상의 나프탈렌 면으로 구조되어야 한다. 나프탈렌의 화학식은 $C_{10}H_8$ 이며, 용융점은 $80.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 끝벽용 나프탈렌 주형을 제작하였고, 이 주형은 각 블레이드에 2개의 나사로 고정된다. 나프탈렌이 주입될 공간의 크기는 $280\text{mm} \times 280\text{mm}$ 이고 깊이는 8mm 이며 주형 내부에는 높이 4mm 의 돌기들이 설치되어 있다. 용융된 나프탈렌은 연삭 가공된 주형덮개와 주형 사이의 공간에 주입구를 통해 주입된다.

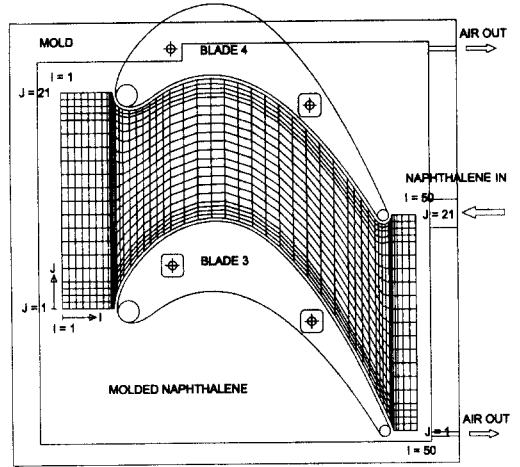


Fig. 4 Measurement locations on the naphthalene surface

나프탈렌이 완전히 응고된 후 주형덮개에 충격을 가해 제거하면 매끄러운 나프탈렌 면이 얻어지며, 이것은 Fig. 1과 같이 익렬에 설치된다.

2.3 측정 방법

주형의 각 위치에서 나프탈렌의 승화된 깊이를 측정하기 위해서 선형가변차동변환기 즉 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 사용하였다. 이 LVDT (Sensotec, model 060-3590-02)의 최대 측정범위는 $\pm 0.5\text{mm}$ 이며 그 분해능은 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 이다. 실험시 나프탈렌의 평균 승화깊이는 대략 0.1mm 정도로 유지되었고, 최대 승화깊이는 0.30mm 정도였다. 이 LVDT는 주철 정반에 설치된 2차원 자동이송장치에 탑재되어 측정하고자 하는 위치로 자동 이송된다. 구조된 끝벽 주형은 풍동에서의 노출실험 전에 먼저 승화깊이 측정시스템에 장착되어 각 측정 위치에서 나프탈렌의 기준 깊이가 측정된다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 x -축 방향으로 50개, y -축 방향으로 21개 등 총 1050 위치에서 승화깊이를 측정하였고, LVDT는 블레이드 면 근처 2mm 정도까지 근접되었다. 1050 위치를 모두 측정하는 데에는 대략 28분 정도의 시간이 소요되었다. 측정이 끝난 주형은 익렬 끝벽에 설치되어 대략 90분 동안 유동장에 노출된 뒤, 승화깊이 측정시스템에서 다시 각 위치에서 나프탈렌 면의 승화깊이가 측정되었다. 이 승화깊이에는 1차 승화깊이 측정

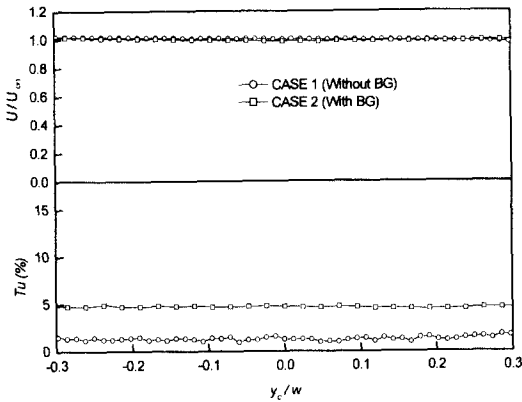


Fig. 5 On-coming turbulence intensity and velocity profiles at $x_c/c = -1.5$

이 이루어진 후 승화된 나프탈렌의 깊이, 주형을 익렬에 설치하는 동안 승화된 깊이, 풍동실험이 끝난 뒤 주형을 측정시스템에 설치하는 동안 승화된 깊이, 정반에 설치된 후 2차 깊이 측정 전에 승화된 깊이 등이 모두 포함되어 있다. 따라서 δz 를 구할 때 이들 값을 모두 고려하여 순수하게 풍동실험에서 승화된 깊이를 구해야 한다. 실제 실험에서 이와 같이 불필요하게 승화된 깊이는 풍동실험 동안 승화된 깊이의 대략 2.5% 정도였다.

나프탈렌 주조면 근처에 설치된 T-형 열전대를 이용하여, 1차 승화깊이 측정시점부터 풍동실험을 거쳐 2차 승화깊이 측정이 끝날 때까지 전 과정의 온도를 1분 간격으로 측정하였다. 이 온도 측정을 위하여 디지털전압계(Keithley, 2001)와 GPIB 보드(National Instruments, AT-GPIB)가 사용되었고, 이 열전대의 보정에는 항온조(Fisher Scientific, 9010)와 표준온도계가 이용되었다. 풍동에서의 노출 실험이 이루어지는 동안, 나프탈렌 표면의 온도의 변화는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내였다. 최종적으로 구한 δz 를 풍동실험 시간 δt 로 나누면 이 시간 동안 승화된 나프탈렌의 평균 깊이가 계산된다. 이 값을 식 (5)에 대입하여 물질전달계수 h_m 을 구하고, 이 h_m 을 식 (9)와 같이 U_∞ 로 무차원화하면 물질전달 Stanton 수 즉 St_m 이 얻어진다. 물론 이 St_m 은 열전달과 물질전달의 유사성을 나타내는 식 (7)에 의해 열전달의 Stanton 수 St 로 변환될 수 있다.

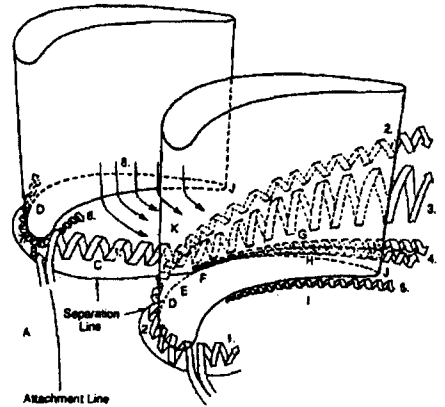


Fig. 6 Three-dimensional vortex flow pattern⁽⁶⁾ in the endwall region

2.4 실험조건 및 측정오차

본 연구에서는 난류발생기가 설치되지 않은 경우(Case 1)와 난류발생기가 설치된 경우(Case 2)에 대하여 실험을 수행하였다. 이 두 경우 모두 자유유동속도를 20m/s로 고정하고 실험을 수행하였다. 따라서 입구유동의 Reynolds 수 ($Re = U_\infty c/\nu$)는 2.78×10^5 이었다. Fig. 5는 익렬 상류 $x_c/c = -1.5$ 에서 측정된 입구 자유유동속도와 입구 난류강도의 폭방향 분포를 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 입구 유동의 평균속도 및 난류강도가 블레이드 2에서 블레이드 5 사이의 통로 전체에 걸쳐 폭방향으로 매우 균일함을 알 수 있다. 난류발생기가 설치되지 않은 경우(Case 1), $x_c/c = -1.5$ 에서 측정된 자유유동 난류강도는 1.3%이며, 경계층두께, 배제두께, 운동량두께는 각각 44.7mm, 5.16mm, 4.04mm이다. 난류발생기가 설치된 경우(Case 2), $x_c/c = -1.5$ 에서 자유유동 난류강도는 4.7%이며, 경계층두께, 배제두께, 운동량두께는 각각 35.5mm, 3.00mm, 2.48mm이다. 본 연구에서는 Abernethy 등⁽¹²⁾의 방법으로 오차해석(uncertainty analysis)을 수행하였다. 그 결과 St_m 의 오차범위는 $\pm 5.7\%$ 로 계산되었다.

3. 결과 및 검토

3.1 끝벽 근처에서의 3차원 유동 특성

끝벽에서의 열(물질)전달 특성은 터빈 익렬 통

로에서의 유동특성과 밀접한 관련이 있다. Fig. 6은 끝벽 영역의 3차원 유동장에서 발생하는 여러 종류의 와류들을 나타낸다.⁽⁶⁾ Fig. 6에서 알 수 있듯이, 끝벽 근처의 3차원 유동은 크게 7개의 주요 와류로 구성된다. Fig. 6에서 끝벽 박리선(separation line)은 익렬로 접근하는 경계층 유동이 끝벽으로부터 박리를 시작하는 위치를 연결한 선이며, 부착선(reattachment line)은 유입 경계층 유동이 인접한 두 익렬 통로로 나뉘어 흐르는 경계선을 나타낸다.⁽¹³⁾ 이 두 선이 만나는 교점이 바로 안장점(saddle point)이다.

블레이드의 선단 근처에서 발생하는 와류는 끝벽 경계층 유동과 블레이드 선단에서의 유동 정체의 상호작용에 의해 발생한다. 입구 경계층 유동이 블레이드 선단 근처에서 박리선을 따라 끝벽으로부터 분리된 뒤, 다시 끝벽 쪽으로 하강하면서 rolling-up 현상이 발생하는데, 이렇게 생성된 와류를 선단말발굽와류(leading-edge horseshoe vortex)라고 한다. 이 선단말발굽와류는 압력면다리(pressure-side leg) Vortex 1과 흡입면다리(suction-side leg) Vortex 2로 구성된다. 익렬 통로로 유입된 유동은 블레이드에 의해 방향이 전환되고, 블레이드 통로에는 압력면(pressure side)에서 흡입면(suction side) 쪽으로 큰 압력구배가 생성된다. 이 압력구배에 의해 Fig. 6의 화살표와 같이 압력면 쪽에서 하강하여 끝벽을 따라 흡입면 쪽으로 이동하는 유동이 발생하며, 이 유동은 흡입면 근처에서 다시 미드스팬 쪽으로 상승한다. 선단말발굽와류의 압력면다리는 끝벽 근처의 저운동량 영역을 통과하면서 통로와류(passage vortex) Vortex 3로 강화되고, 통로를 가로질러 인접 흡입면 쪽으로 이동한다. 흡입면에 도달한 통로와류는 끝벽과 분리되어 상승한다. 반면에 선단말발굽와류의 흡입면 다리는 블레이드 선단과 끝벽의 접합부를 따라 이동하다가 끝벽 박리선을 만나면서 상승하여 끝벽과 분리된다. 이렇게 끝벽으로부터 박리된 흡입면다리는 통로와류와 근접한 채 흡입면 근처에서 하류로 이동한다. 블레이드 압력면 쪽에서 끝벽으로 향하는 강한 하향류(downwash flow)가 끝벽과 평행하게 방향전환을 하는 도중, 압력면과 끝벽이 만나는 모서리에 압력면모서리와류(pressure-side corner vortex) Vortex 5가 생성된다. 이와 마찬가지로 흡입면과 끝벽이 만나는 모서리에도 한 쌍의 흡입면모서리

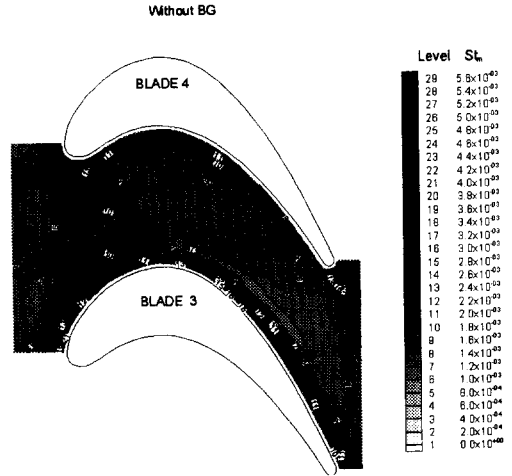


Fig. 7 Contours of local mass-transfer Stanton number, St_m , in Case 1

와류(suction-side corner vortex) 즉 Vortex 4가 생성된다. 이 흡입면의 모서리와류들은 끝벽 박리선 하류 영역에서 발생하여 하류로 이동하면서 그 영역이 점차 확대된다. 압력면 쪽과는 달리 흡입면쪽의 모서리와류가 2개 발생되는 것은 통로와류의 존재와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾ 앞에서 언급한 바 있는 선단말발굽와류는 블레이드 선단과 끝벽이 접하는 모서리에서 한 쌍의 모서리 와류를 발생시키는 역할을 한다. 이 선단모서리와류(leading-edge corner vortex) Vortex 6과 Vortex 7은 선단말발굽와류와 반대방향으로 회전한다. 블레이드 끝단(trailing edge) 하류에서는 압력면 경계층유동과 흡입면 경계층유동이 서로 만나면서 강한 혼합과 전단작용(shearing)이 발생하며, 이에 따라 이 후류(wake) 영역에서는 large-eddy 유동이 존재한다.

3.2 국소 물질전달 Stanton 수

Fig. 7은 난류발생기가 설치되지 않은 경우 (Case 1)의 국소 물질전달 Stanton 수 St_m 의 분포를 나타낸다. 전체적으로 볼 때, St_m 은 끝벽에서 국소적으로 크게 변화하며, 그 값은 최소 1.2×10^{-3} 정도에서 최대 5.0×10^{-3} 에 이른다. St_m 은 선형 익렬 통로의 중심 영역에서는 비교적 작은 값을 가지며, 블레이드와 인접한 영역에서 큰 값을 갖는다. 특히 St_m 이 큰 영역은 블레이드 선단 근처, 블레이드 흡입면 근처 중간부, 블레이드 끝단

하류 후류(wake) 영역이다. 이 영역들에서는 심한 열부하가 존재하므로, 적절한 냉각이 필요할 것이다. 블레이드 선단 영역에서 St_m 이 국소적으로 매우 큰 것은 앞에서 언급한 바와 같이 선단말발굽와류와 선단모서리와류 때문이다. St_m 의 분포를 자세히 관찰해 보면, 블레이드 4의 선단 근처에서 익렬 통로를 대각선 방향으로 가로지르는 영역에서의 St_m 이 비교적 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이 영역은 선단말발굽와류의 압력면 다리가 하류로 이동하면서 통로와류로 발달되는 영역과 일치한다. 이 통로와류는 흡입면과 부딪히면서 끝벽으로부터 분리되어 하류로 이동한다. 이 과정에서 발생하는 유동의 교란에 의해 익렬 통로 중간부($x/b = 0.5$) 흡입면 모서리 영역에서의 끝벽 열전달이 크게 촉진된다. 이 영역에서의 St_m 값은 블레이드 선단 영역보다는 작지만, 익렬 통로 중심 영역에 비해서는 큰 값을 갖는다. 하류 쪽 익렬 통로에서 압력면과 흡입면 근처의 St_m 이 통로 중심보다 더 큰 이유는 블레이드 근처에 압력면모서리와류와 흡입면모서리와류가 존재하기 때문이다. 흡입면모서리와류는 1쌍이 존재하므로 압력면 쪽보다 흡입면 근처에서 St_m 의 값이 더 크게 나타나며, 그 영역도 더 넓음을 알 수 있다. 끝벽 열전달 분포 중 한가지 특이한 점은 St_m 의 최소값 ($St_{m,min} = 1.2 \times 10^{-3}$)이 터빈 통로의 입구가 아닌 통로 내부에 존재한다는 것이다. 다시 말하면, St_m 이 최소가 되는 영역은 블레이드 흡입면 모서리를 따라 존재하는 St_m 이 큰 영역의 안쪽(통로 중심부 쪽)에 흡입면과 평행하게 존재한다. 이 영역에서 St_m 이 작은 것은 통로와동에 의해 유동이 막히면서 유속이 감소하여, 대류 열전달이 억제되기 때문일 것이다. 열부하가 크게 작용하는 영역으로 블레이드 끝단 바로 하류 영역이 있는데, 이 영역에서 St_m 이 증가하는 이유는 끝단 하류에서 발생하는 후류의 영향 때문이다. 이 후류 영역에서는 large-scale의 난류유동이 존재하므로 열(물질)전달이 크게 촉진된다. 실험조건과 블레이드의 형상이 본 연구와 다른 Goldstein과 Spore⁽⁶⁾에서도 본 연구와 정성적으로 비슷한 열(물질)전달 분포가 나타났다.

Fig. 8은 난류발생기가 설치된 경우(Case 2)의 국소 물질전달 Stanton 수 St_m 의 분포를 나타낸다. 난류강도가 증가하여도 St_m 의 분포는 Fig. 7과 비교할 때 정성적으로 거의 동일함을 알 수 있다.

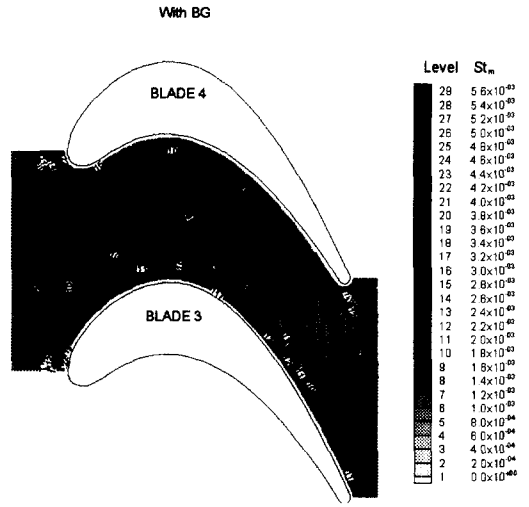


Fig. 8 Contours of local mass-transfer Stanton number, St_m , in Case 2

특히 난류강도가 작은 경우와 마찬가지로 블레이드 선단 부근, 흡입면 모서리근처 영역, 블레이드 끝단 후류 영역 등에서 St_m 이 큰 값을 가질 뿐만 아니라, St_m 이 최소가 되는 곳도 거의 동일한 위치에서 발견되었다. 그러나 입구 자유유동의 난류강도가 큰 경우(Case 2)의 St_m 이 난류강도가 비교적 작은 경우에 비하여(Case 1)에 비하여 전반적으로 조금 더 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 난류발생기가 설치되지 않은 경우(Case 1)에 대해, 국소 물질전달 Stanton 수의 하류방향 분포를 그린 것이다. Fig. 9에 나타난 J 는 Fig. 4에 정의된 바와 같다. 따라서 " $J = 1$ "은 1가 1에서 50까지 변화할 때 아래쪽 측정 위치들을 의미하고, " $J = 21$ "은 1가 1에서 50까지 변화할 때 가장 윗쪽의 측정 위치들을 의미한다. $J=1$ 과 $J=21$ 일 때, $x/b = -0.2$ 에서 x/b 가 0.0 직전까지의 St_m 이 서로 잘 일치하고 있는데 이 사실은 익렬 입구의 유동이 정확하게 대칭임을 의미한다. St_m 은 $J=21$ 일 때 x/b 가 0.0 근처에서 5.0×10^{-3} 에 이를 정도까지 크게 증가하며, x/b 가 1.0에서 다시 급격히 증가한 뒤 감소한다. $J=1$ 일 때 $J=21$ 일 때와 마찬가지로 선단 근처에서 St_m 의 급격한 증가가 있으나, x/b 가 0.5 근처에서도 또 다른 극대값이 존재한다. 이 극대값은 블레이드 3의 흡입면 쪽 모서리 영역에서 통로와류와 흡입면의 충돌에 의한 유동의 교란 때문에 발생된다. 그러나 $J=1$

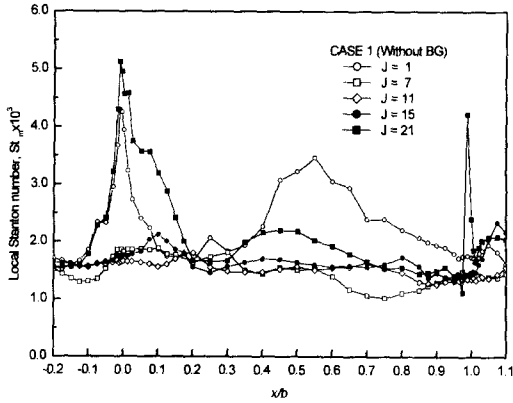


Fig. 9 Local mass-transfer Stanton number, St_m , along constant J -lines in Case 1

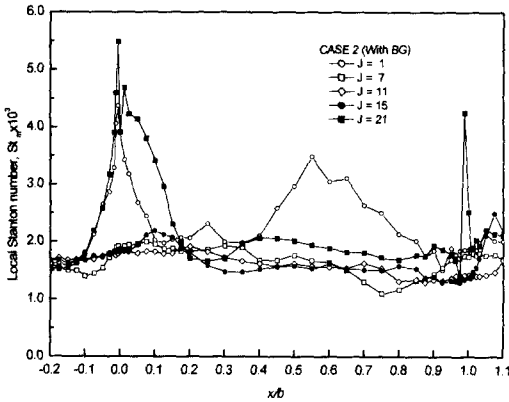


Fig. 10 Local mass-transfer Stanton number, St_m , along constant J -lines in Case 2

일 경우, 블레이드 하류에서의 측정점이 후류영역을 지나지 않으므로, $J=21$ 에서 $x/b=1.0$ 근처에서 발견되는 극대값은 존재하지 않는다. Fig. 9에서 St_m 은 통로 중심에 해당하는 $J=11$ 에서가 아니라, $J=7$ 인 경우에 비교적 작은 값을 갖는다. 특히 $J=7$ 일 때, x/b 가 0.75 근처에서 St_m 이 최소가 됨을 알 수 있다. 그 이유는 Fig. 7의 설명에서 언급한 바와 같이 흡입면 쪽 중간부의 통로와동 배면에 저열전달 영역이 존재하기 때문이다. Fig. 9를 통해서 블레이드와 인접한 모서리 영역에서의 St_m 이 통로 중심부보다 더 크고, 모서리 영역 중에서도 흡입면 모서리 영역의 열부하가 더 큼을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 난류발생기가 설치된 경우(Case 2)의 국소 물질전달 Stanton 수의 하류방향 분포를 그

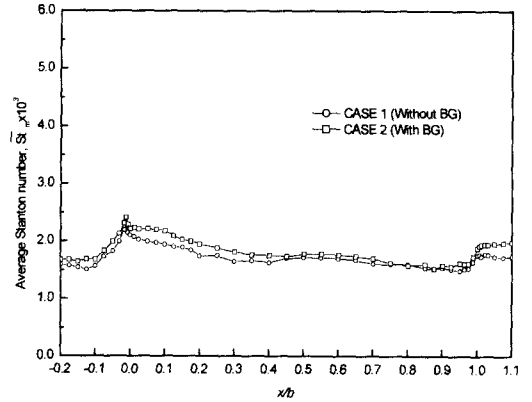


Fig. 11 Mass-transfer Stanton number averaged in the y -direction, \overline{St}_m

린 것이다. 전체적인 분포는 Fig. 9의 경우와 동일하나, Case 2의 St_m 이 Case 1보다 더 크게 나타난다. 이것은 자유유동 난류강도의 증가가 열전달을 촉진시키고 있음을 의미한다. 이와함께 난류강도가 클수록 통로 중심부에서 St_m 의 폭방향 즉 y -축 방향으로의 변화가 비교적 작았다.

3.3 평균 물질전달 Stanton 수

Fig. 11은 y -축 방향으로 평균된 물질전달 Stanton 수 \overline{St}_m 의 x -축 방향으로의 변화를 나타낸다. 이 \overline{St}_m 은 입구 자유유동의 난류강도에 관계없이 x/b 가 0.0에서 최대가 된 뒤 계속 완만하게 감소하며, $x/b=1.0$ 에서 다시 증가하는 경향을 보인다. 그리고 대부분의 영역에서 Case 2의 \overline{St}_m 이 Case 1보다 더 크게 나타났다. 측정영역 전체에 걸쳐 평균된 물질전달 Stanton 수는 Case 1과 Case 2에서 각각 1.70×10^{-3} 과 1.77×10^{-3} 으로 계산되었다. 따라서 난류강도가 4.7%의 경우 난류강도가 1.3%에 비하여 4.1%의 열(물질)전달 증가 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 이 정도의 열(물질)전달 증가분은 본 실험의 오차범위인 $\pm 5.7\%$ 이내이다.

4. 결론

본 연구에서는 산업용 가스터빈 엔진의 터빈 제1단 동익 끝벽에서의 열부하(heat load) 데이터

를 구하였다. 이를 위해 나프탈렌승화법을 적용하여 국소 열(물질)전달계수를 측정하였고, 이것을 Stanton 수의 형태로 제시하였다. 이때 끝벽의 경계조건은 등온조건에 해당된다. 본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 나프탈렌승화법을 이용하여 국소적으로 매우 자세한 열(물질)전달 데이터를 얻을 수 있었으며, 본 연구의 결과는 터빈 끝벽의 냉각시스템 설계의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

(2) 측정 결과, 블레이드 선단 근처와 블레이드 끝단 후류 영역에 매우 큰 열(물질)전달이 존재함을 확인하였고, 통로와류가 흡입면과 만나는 영역에서의 열(물질)전달도 비교적 크게 나타났다.

(3) 일반적으로 열(물질)전달은 익렬 통로 중심부에서 비교적 작은 반면, 블레이드 인접 모서리 영역에서는 크게 나타났다.

(4) 터빈 끝벽에서의 열(물질)전달은 끝벽 근처의 복잡한 3차원 유동과 밀접한 관련이 있었다.

(5) 입구 자유유동의 난류강도에 관계없이 열(물질)전달의 분포는 정성적으로 거의 동일하였다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Wang, H.P., Olson, S.J., Goldstein, R.J. and Eckert, E.R.G., 1997, "Flow Visualization in a Linear Turbine Cascade of High Performance Turbine Blade," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 1~8.
- (2) Blair, M.F., 1974, "An Experimental Study of Heat Transfer and Film Cooling on Large-Scale Turbine Endwalls," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 96, pp. 524~529.
- (3) Graziani, R.A., Blair, M.F., Taylor, J.R. and Mayle, R.E., 1980, "An Experimental Study of Endwall and Airfoil Surface Heat Transfer in a Large Scale Turbine Blade Cascade," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 102, pp. 257~267.
- (4) York, R.E., Hylton, L.D. and Mihelc, M.S., 1984, "An Experimental Investigation of Endwall Heat Transfer and Aerodynamics in a Linear Vane Cascade," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 159~167.
- (5) Gaugler, R.E., and Russell, L.M., 1984, "Comparison of Visualized Turbine Endwall Secondary Flows and Measured Heat Transfer Pattern," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 168~172.
- (6) Goldstein, R.J. and Spores, R.A., 1988, "Turbulent Transport on the Endwall in the Region Between Adjacent Turbine Blades," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 862~869.
- (7) 이상우, 신세현, 이택식, 이준식, 1988, "막냉각되는 평판에서의 열전달특성에 관한 실험적 연구 - 분사각도와 분사율의 영향 -, " 대한기계학회논문집, 제12권, pp. 1415~1427.
- (8) 이준식, 이택식, 이상우, 1991, "막냉각되는 원봉 표면에서의 물질전달에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제15권, pp. 1756~1762.
- (9) 권혁진, 우성제, 조형희, 2000, "사각덕트 내부 열전달 향상을 위한 요철의 단락 효과," 대한기계학회논문집(B), 제24권, pp. 744~752.
- (10) Goldstein, R.J. and Cho, H.H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (11) Ambrose, D., Lawrenson, I.J. and Sprake, C.H.S., 1975, "The Vapour Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (12) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.
- (13) 차봉준, 이상우, 현용익, 이대성, 1993, "선형 터빈 케이스케이드 통로에서의 3차원 유동특성," 대한기계학회논문집, 제17권, pp. 3148~3165.