

4-축 나프탈렌 승화깊이 측정시스템을 이용한 터빈 블레이드 표면에서의 열(물질)전달계수 측정

권 현 구* · 이 상 우** · 박 병 규***

Measurement of Heat (Mass) Transfer Coefficient on the Blade Surfaces of a Linear Turbine Rotor Cascade With a Four-Axis Naphthalene Profile Measuring System

Hyun Goo Kwon, Sang Woo Lee and Byung Kyu Park

Key Words: Heat (Mass) Transfer Coefficient (열(물질)전달계수), Naphthalene Sublimation Technique (나프탈렌승화법), Four-Axis Profile Measurement System (4-축 형상측정 시스템), Turbine Cascade(터빈 익열)

Abstract

The heat (mass) transfer characteristics on the blade surface of a first-stage turbine rotor cascade for power generation has been investigated by employing the naphthalene sublimation technique. A four-axis profile measurement system is successfully developed for the measurements of the local heat (mass) transfer coefficient on the curved blade surface. The experiment is carried out at the free-stream Reynolds number and turbulence intensity of 2.09×10^5 and 1.2%. The results on the blade surfaces show that the local heat (mass) transfer on the suction surface is strongly influenced by the endwall vortices, but that on the pressure surface shows a nearly two-dimensional nature. The pressure surface has a more uniform distribution of heat load than the suction one.

1. 서 론

가스터빈 엔진의 효율을 향상시키기 위해서는 터빈 입구온도(turbine inlet temperature)를 높여야 하며, 현재 터빈입구 온도는 1500℃에 이르고 있다. 이와 같이 높은 입구온도 때문에 고온의 가스와 접하는 터빈의 여러 구성 요소에 대한 냉각이 필수적이며, 이들 고온 부품에서의 정확한 열 전달계수를 알아야 적절한 냉각 시스템을 도입할 수 있다. 따라서 열전달계수의 측정은 터빈의 열 시스템 설계에 있어서 매우 중요한 기초 데이터

이다. 대부분의 터빈 블레이드에서는 냉각이 이루어지고 있으며, 본 연구의 목적은 터빈 블레이드 전체 표면에서의 정확한 열전달계수 분포를 측정하는 것이다.

Bayley와 Priddy⁽¹⁾는 끝벽의 영향이 무시할 정도로 작은 블레이드 미드스팬 근처 2차원 유동 영역에서 터빈 블레이드 표면에서의 열전달 특성을 연구하였다. 그들은 자유유동의 난류강도 변화에 따른 블레이드 표면에서의 층류-난류 천이가 열전달에 주는 영향에 대해 고찰하였다. Chen과 Goldstein⁽²⁾은 나프탈렌 승화법을 적용하여 블레이드 흡입면에서의 열전달 특성을 연구하였다. 그들은 미드스팬 근처 2차원 유동 영역 뿐만 아니라 끝벽 근처에서 3차원 유동영역에서의 열전달 특성을 파악하였다. Goldstein 등⁽³⁾은 선형 터빈 블레이드 압력면 및 흡입면 표면에서의 대류 전달현상에 대하여 연구하였다. 그들은 블레이드 표면에서의 유동 박리가 열전달 특성에 미치는

* 금오공과대학교 기계공학과 대학원

** 금오공과대학교 기계공학부

*** 한국기계연구원 열유체환경연구부

영향을 연구하기 위하여, 블레이드 선단에 트립 와이어(trip wire)가 설치된 경우와 그렇지 않은 경우의 실험 결과를 비교하였다. 그 결과 유동의 박리와 재부착이 블레이드 표면에서의 열전달에 큰 영향을 주었고, 통로와류와 이것에 의해 야기되는 새로운 와류에 의하여 끝벽 근처 흡입면에서 열전달계수가 크게 증가함을 밝혔다.

본 연구에서는 나프탈렌승화법을 이용하여 코드길이(chord length)에 대한 스패(span)의 비가 비교적 작은 발전용 터빈 제 1 단 동익 표면에서 열부하 분포를 측정하고자 한다. 이를 위해 블레이드 표면과 같은 복잡한 곡면에서 나프탈렌의 승화량을 정확히 측정하기 위한 정밀 4축 형상측정시스템의 개발하고, 이것을 이용하여 동익 압력면과 흡입면에서의 열(물질)전달계수를 측정하였다.

2. 실험

2.1 나프탈렌 승화법 (naphthalene sublimation technique)

열전달의 연구에 있어서 열전달과 물질전달의 유사성(heat/mass transfer analogy)을 이용한 실험 방법이 널리 이용되고 있다. 나프탈렌승화법은 그 중 한 방법으로 열전달계(heat transfer system)와 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)를 구하는 방법이다.⁽⁴⁾ 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 등온 조건에 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 나프탈렌 벽면으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 나프탈렌 농도 $\rho_{v,\infty}$ 는 0이므로,

물질전달계수는 다음과 같이 된다.

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

나프탈렌 표면에서의 질량유속(mass flux) \dot{m} 은 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이 δz 를 측정함으로써 다음의 식으로 얻어진다.

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

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

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

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⁽⁵⁾이 제안한 증기압 실험식을 사용하여 $P_{v,w}$ 를 구하였다.

만약 Prandtl 수 Pr 과 Schmidt 수 Sc , 난류 Prandtl 수 Pr_t 와 난류 Schmidt 수 Sc_t 가 각각 서로 같고, 동시에 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,⁽⁴⁾ 일반적으로 공기의 Pr 과 공기 중에서 확산되는 나프탈렌의 Sc 는 서로 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.

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

여기서 St_m 은 물질전달 Stanton 수이다. 식 (6)과 식 (7)에서 상수 n 은 대략 0.33 ~ 0.4 정도의 값을 갖는다. 식 (6)의 Sh 와 식 (7)의 St_m 은 다음과 같이 정의된다.

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

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

식 (8)에서 주어진 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수(D)는 온도와 압력의 함수이며 Goldstein과 Cho⁽⁴⁾에 그 관계식이 주어져 있다. 본 연구에서는 식 (8)의 형태로 물질전달계수를 무차원화하였

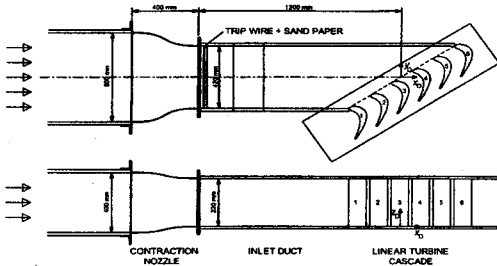


Fig. 1 Overall view of cascade wind tunnel.

다.

2.2 실험장치

본 연구에서 사용된 익열 풍동(cascade wind tunnel)은 개방형 풍동, 수축부 (contraction nozzle), 입구덕트, 익열 등으로 구성된다(Fig. 1).

개방형 풍동은 면적축소비가 9.0이고, 출구의 단면은 600mm×400mm이다. 이 개방형 풍동의 출구에는 길이 1.8m의 사각덕트가 연결되어 있다. 이 사각덕트를 통과한 균일 유동은 수축부를 지나 익열 입구덕트로 유입된다. 이 입구덕트의 단면은 420mm×320mm이고, 폭방향 중심에서 그 길이는 1.2m이다. 이것의 입구 상하 벽에는 직경 2mm의 트립와이어(trip wire)와 사포(sand paper)가 차례로 부착되어 있어서, 상하 벽 근처의 유동이 다시 난류 경계층으로 발달된다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 익열에는 총 6개의 선형 블레이드가 설치되어 있다. 이것은 발전용 가스터빈의 터빈 제 1 단 동익의 미드스팬 형상을 근거로 large-scale로 제작되었다. 이 선형 블레이드의 코드길이(c), 피치(p), 스패น(s)는 각각 217.8mm, 151.6mm, 320.0mm 등이며, 그 회전각(turning angle)은 129도이다. 나머지 중요 제원은 Fig. 2에 제시되어 있으며, 그 형상 좌표는 이상우 등⁽⁶⁾에 자세히 기술되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 3번과 4번 블레이드에 의해 형성된 유로의 피치방향 중심을 $x_D y_D z_D$ 좌표계의 원점으로 설정하였고, 하류방향을 x_D 축, 입구덕트의 폭방향을 y_D 축, 그리고 높이방향을 z_D 축으로 설정하였다. 그리고 Fig. 2와 같은 새로운 블레이드 좌표계 xyz 도 도입하였다. Fig. 2에서 s_p 와 s_s 는 각각 블레이드 정체점으로부터 압력면과 흡입면 표면을 따라 이동한 거리를 나타낸다.

본 연구에서는 IBM PC AT-486으로 온도, 경계층 속도, 난류 측정시스템 전체를 온라인화 하였으며, 이를 위해 다기능입출력보드 (National Instruments, AT-MIO-16D-H-9)가 컴퓨터에 내장되어 있다. 압력변환기 (Furness Controls, FCO12)에

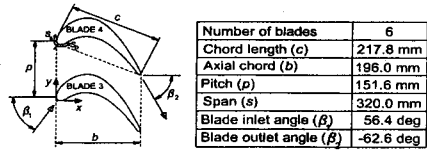


Fig. 2 Arrangement of turbine blade cascade.

의해 변환된 압력신호는 다기능입출력보드의 12비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 경계층 유동 측정시, 프로우브의 정밀한 이송을 위해 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 이 장치는 3축 방향으로 컴퓨터에 의해 자동이송되는데, 각 이송축은 불나사와 직선운동가이드로 이루어진 직선유니트, 스테핑모터 및 스테핑모터 드라이버 등으로 구성되어 있다. 이 3차원 이송장치는 수평조절이 가능한 지지대에 탑재되어 있다. 스테핑모터는 전용 드라이버의 펄스입력을 통해서 제어는데, 이 디지털 펄스는 다기능입출력보드로부터 공급된다. 입구 자유유동의 난류강도를 측정하기 위해서 정온형 열선유속계(Kanomax, 1010)와 선형화기(Kanomax, 1013)를 사용하였다.

2.3 측정 방법

나프탈렌승화법을 적용하여 열전달 특성을 연구하려면, 측정하고자 하는 영역이 열전달계와 동일한 형상의 나프탈렌 면으로 구조되어야 한다. 나프탈렌의 화학식은 $C_{10}H_8$ 이며, 그 용융점은 80.2 °C이다. 용융된 나프탈렌은 주입구를 통해 연삭 가공된 주형덮개와 주형 사이의 공간으로 들어간다. 나프탈렌이 완전히 응고된 후, 구조면과 평행한 방향으로 주형덮개에 충격을 가해 분리하면 매끄러운 나프탈렌 면이 얻어진다.

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 ± 0.5 mm이며 그 분해능은 0.5 μ m이다. 실험시 평균 나프탈렌 승화깊이는 대략 0.1mm 정도로 유지되었고, 최대 승화깊이는 0.30mm 정도였다. Fig. 3은 블레이드 표면에서 나프탈렌의 승화된 깊이를 측정하는데 사용되는 4축 형상측정시스템을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 이 측정 시스템은 크게 블레이드 회전장치와 3차원 자동 이송장치로 구분된다. 블레이드 회전장치는 구조된 블레이드를 회전시키는 작용을 하며, 블레이드의 회전은 하모닉 감속기어(Oriental Motor, UHG50-2C)가 장착된 AC 서보모터(Oriental Motor, KXSM240HG1-BL)에 의해 이루어진다. 이 하모닉 기어의 감속비는 50

이며 백래쉬는 무시할 정도로 작다. 따라서 회전장치의 각도 분해능은 0.0072도에 불과하다. 이와 같이 구조된 블레이드를 회전시키는 목적은 LVDT가 블레이드 표면과 항상 수직으로 유지되어야 하기 때문이다. LVDT는 주철 정반에 설치된 3차원 자동이송장치에 탑재되어 측정하고자 하는 위치로 자동 이송된다. 특히 블레이드의 회전축이 3차원 자동 이송장치의 높이 방향 이송축과 정확히 평행이 되어야 한다. 이 블레이드 표면에서는 스펠 방향 (z-축 방향)으로 16개, 흡입면과 압력면을 모두 합해 코드 방향 (x-축 방향)으로 62개 등 총 992 위치에서 승화깊이를 측정하였다.

제대로 구조된 나프탈렌 블레이드 주형은 풍동에서의 노출실험에 앞서 4축 표면형상 측정시스템에 장착되어 각 측정 위치에서 나프탈렌의 기준 깊이가 측정된다. 이렇게 측정이 끝난 주형은 Fig. 1에서와 같이 익열에 설치되어 대략 90분 동안 유동장에 노출되었다. 풍동 실험이 끝난 주형은 이 형상 측정시스템에 다시 장착되어 각 위치에서 나프탈렌 면의 승화깊이가 측정된다. 이 승화깊이에는 1차 승화깊이 측정이 이루어진 후 승화된 나프탈렌의 깊이, 주형을 익열에 설치하는 동안 승화된 깊이, 풍동실험이 끝난 뒤 주형을 측정시스템에 설치하는 동안 승화된 깊이, 정반에 설치된 후 2차 깊이측정 전에 승화된 깊이 등이 모두 포함되어 있다. 따라서 δl 을 구할 때 이들 값을 모두 고려하여 순수하게 풍동실험에서 승화된 깊이를 구해야 한다. 실제 실험에서 이와 같이 불필요하게 승화된 깊이는 풍동실험 동안 승화된 깊이의 대략 3% 정도였다. 주형에 설치된 T-형 열전대를 통하여 1차 승화깊이 측정시점부터 풍동실험을 거쳐 2차 승화깊이 측정이 끝날 때까지 전 과정의 온도를 1분 간격으로 측정하여 컴퓨터에 저장하였다. 온도측정을 위하여 디지털 전압계(Keithley, 2001)와 GPIB 보드(National Instruments, AT-GPIB)가 사용되었고, 이 주형 열전대의 보정은 항온조(Fisher Scientific, 9010)와 표준온도계가 이용되었다. 실제로 992 위치를 모두 측정하는 데에는 대략 50분 정도의 시간이 소요되었다. 풍동에서의 노출 실험시, 평균온도는 대략 28.8℃ 정도였고, 온도의 변화는 이 평균 온도의 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내였다. 최종적으로 구한 δl 을 풍동 실험시간 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 (8)과 같이 무차원화 하면 Sherwood 수 Sh 가 얻어진다. 물론 이 Sh 는 열전달과 물질전달의 유사성을 나타내는 식 (6)에 의해 열전달의 Nusselt 수 Nu 로 변환될 수 있다.

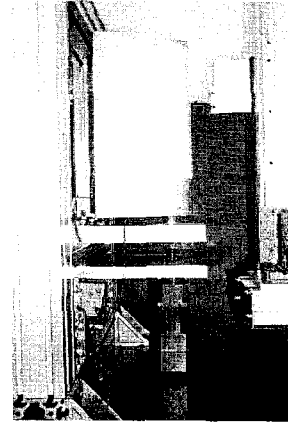


Fig.3 Four-axis profile measurement system.

본 연구에서는 자유유동 속도를 15m/s로 고정하고 실험을 수행하였다. 따라서 입구유동의 Reynolds 수 ($Re_\infty = U_\infty c / \nu$)는 2.09×10^5 이었다. 이때 $x/c = -1.5$ 에서 자유유동 난류강도는 1.2%이며, 끝벽에서 경계층두께, 배제두께, 운동량두께는 각각 44.7mm, 5.16mm, 4.04mm이었다.

3. 결과 및 검토

3.1 끝벽 근처에서의 3차원 유동 특성

끝벽에서의 열(물질)전달 특성은 터빈 익열 통로에서의 유동특성과 밀접한 관련이 있다. Fig. 4은 끝벽 영역의 3차원 유동장에서 발생하는 여러 종류의 와류들을 나타낸다.⁽⁷⁾ 여기서 알 수 있듯이 끝벽 근처의 3차원 유동은 크게 7개의 주요 와류로 구성된다. Fig. 4에서 끝벽 박리선(separation line)은 익열로 접근하는 경계층 유동이 끝벽으로부터 박리를 시작하는 위치를 연결한 선이며, 부착선(reattachment line)은 유입 경계층 유동이 인접한 두 익열 통로로 나뉘어 흐르는 경계선을 나타낸다. 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 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 와류 1으로 표시된 압력면다리(pressure-side leg)와 와류 2로 표시된 흡입면다리(suction-side leg)로 구성된다. 익열 통로로 유입된

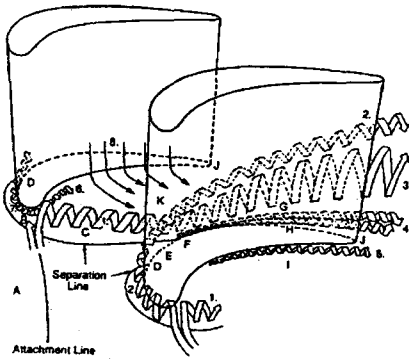


Fig.4 Three-dimensional vortex flow pattern in the endwall region.

유동은 블레이드에 의해 방향이 전환되고, 블레이드 통로에는 압력면(pressure side)에서 흡입면(suction side) 쪽으로 큰 압력구배가 생성된다. 이 압력구배에 의해 Fig. 4에 화살표들로 표시된 바와 같이 압력면 쪽에서 하강하여 끝벽을 따라 흡입면 쪽으로 이동하는 유동이 발생하며, 이 유동은 흡입면 근처에서 다시 미드스팬 쪽으로 상승한다. 선단말발급와류의 압력면다리는 끝벽 근처의 저운동량 영역을 가로질러 인접 흡입면 쪽으로 이동하면서 통로와류(passage vortex) 즉 와류 3로 발달된다. 흡입면에 도달한 통로와류는 Fig. 4와 같이 끝벽과 분리되어 상승한다. 반면에 선단말발급와류의 흡입면 다리는 블레이드 선단과 끝벽의 접합부를 따라 이동하다가 끝벽 박리선을 만나면서 상승하여 끝벽과 분리된다. 이렇게 끝벽으로부터 박리된 흡입면다리는 통로와류와 근접한 채 하류로 이동한다.

블레이드 압력면 쪽에서 끝벽으로 향하는 강한 하향류(downwash flow)가 끝벽과 평행하게 방향 전환을 하는 도중, 압력면과 끝벽이 만나는 모서리에는 와류 5로 표시된 압력면모서리와류(pressure-side corner vortex)가 생성된다. 이와 마찬가지로 흡입면과 끝벽이 만나는 모서리에도 흡입면모서리와류(suction-side corner vortex) 즉 와류 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. 앞에서 언급한 바 있는 선단말발급와류는 블레이드 선단과 끝벽이 만나는 모서리에서 한 쌍의 모서리 와류를 발생시키는 역할을 한다. 이 선단모서리와류(leading-edge corner vortex) 즉 와류 6과 와류 7은 선단말발급와류의 압력면다리 및 흡입면다리와 각각 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 Sherwood 수 분포

Fig. 5는 압력면에서의 국소 Sherwood 수 Sh 의 분포를 나타낸다. 이 압력면에서는 정체점 근처에서 Sh 의 값이 가장 크고 스펀 방향으로 거의 일정한 분포를 보여 준다. 그리고 끝벽 근처의 Sh 분포를 살펴보면, 압력면에서 끝벽의 존재로 인한 3차원 유동 즉 압력면 모서리와류의 영향으로 z/s 가 0.1보다 작은 영역의 등 Sh 선이 크게 변형되어 있다. 정체점에서 하류방향으로 이동함에 따라 Sh 는 급격히 감소하여 $s_p/C = 0.1$ 에서 Sh 가 대략 300 정도의 최소값을 갖는다. 이후 Sh 는 다시 증가하여 s_p/C 가 0.2와 0.25 사이에서 1200 정도의 극대값을 가진 뒤, 이후에는 매우 완만하게 감소한다. 특히 s_p/C 가 0.8부터 1.05 사이의 영역에서는 Sh 가 600 정도로 매우 균일하였다. 그러나 블레이드의 끝단에 도달하면 Sh 가 다시 증가하였다. Fig. 6은 흡입면에서의 국소 Sherwood 수 Sh 의 분포를 나타낸다. 흡입면의 경우에도 블레이드 선단 및 끝단 근처에서 흡입면에서 압력면과 마찬가지로 Sh 가 큰 값을 갖는다. 그러나 흡입면에서는 압력면 선단 하류 ($0.0 < s_p/C < 0.2$)에서 발생하는 Sh 의 감소-증가 현상은 관찰되

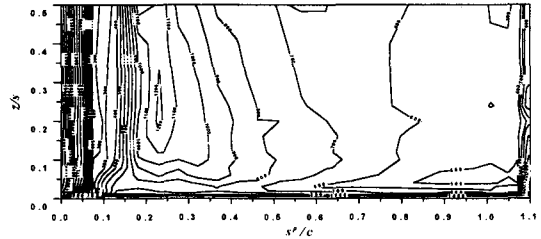


Fig.5 Contours of Sherwood, Sh , on the pressure surface.

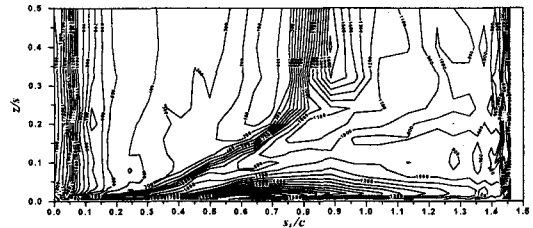


Fig.6 Contours of Sherwood, Sh , on the suction surface.

지 않았다.

흡입면의 Sh는 미드스팬을 따라 s_s/C 가 대략 0.65에 이를 때까지 지속적으로 감소하는 경향을 보여 주며, 그 이후에는 급격히 증가하여 s_s/C 가 0.9에서 최대 1600 정도에 이른 뒤 다시 완만히 감소하였다. 끝벽 근처에서는 압력면과는 달리 끝벽에 의해 발생하는 톱로와류 및 흡입면 모서리 와류 등에 의해 Sh의 분포가 스펀방향 즉 z-축 방향으로 크게 변형된다. 흡입면 미드스팬 근처에서 Sh의 구배가 매우 큰 영역은 $0.7 < s_s/C < 0.9$ 에 존재하고 z-축과 거의 평행하다. 그러나 톱로와류의 존재로 인하여 $z/s < 0.25$ 에서는 Sh의 구배가 심한 영역은 끝벽에 근접함에 따라 블레이드 선단 쪽으로 크게 휘는 현상이 발견된다. 이 영역들을 연결한 곡선의 상류 영역에 나타나는 저 Sh 영역은 경계층의 박리가 일어난 영역으로 생각되며, 그 경계 곡선의 하류부는 경계층 유동이 재부착되는 영역으로 판단된다. 특히 이 경계선 하류의 미드스팬 근처 $s_s/C = 0.9$ 에서 관찰되는 Sh가 매우 큰 영역은 경계층 유동의 강력한 재부착을 입증해 주고 있다. 이 재부착이 일어나는 영역 하류에서는 Sh의 값이 비교적 큰 값으로 유지되고, 그 분포도 비교적 균일하였다. 끝벽에 매우 가까운 $z/s < 0.05$ 에서는 흡입면 모서리 와류에 의하여 Sh가 크게 증가하고 있으며, $s_s/C < 0.65$ 를 전후하여 Sh의 최대치가 2000에 육박한다.

4. 결론

(1) 본 연구에서는 블레이드 표면과 같은 복잡한 곡면에서 나프탈렌의 승화량을 정확히 측정하기 위하여, 정밀 4축 형상측정시스템의 성공적으로 개발하였다.

(2) 일반적으로 블레이드의 선단과 끝단에는 비교적 큰 열부하가 존재하였고, 중간부에서는 열부하가 비교적 균일하였다.

(3) 블레이드 압력면에서의 열부하 분포는 흡입면에 비하여 비교적 균일한 경향을 보이며, 스펀 방향의 변화도 그다지 심하지 않았다.

(4) 블레이드 흡입면에서의 열부하는 압력면에 비하여 끝벽에 의해 야기되는 3차원 와류의 영향을 매우 크게 받았고, 국소적으로 열부하의 변화가 심하게 나타났다.

후기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Bayley, F. J., and Priddy, W. J., 1981, "Effects of Free-Stream Turbulence Intensity and Frequency on Heat Transfer to Turbine Blading," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 103, pp. 60~64.
- (2) Chen, P. H., and Goldstein, R. J., 1992, "Convective Transport Phenomena on the Suction Surface of a Turbine Blade Including the Influence of Secondary Flows Near the Endwall," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 776~787.
- (3) Goldstein, R. J., Wang, H. P., and Jabbari, M. Y., 1995, "The Influence of Secondary Flows Near the Endwall and Boundary Layer Disturbance on Convective Transport From a Turbine Blade," *ASME Journal of Yurbomachinery*, Vol. 117, pp. 657~665.
- (4) 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.
- (5) Ambrose, D., Lawrenson, I.J. and Sprake, C.H.S., 1975, "The Vapour Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (6) 이상우, 전상배, 박병규, 2001, "나프탈렌승화법을 이용한 터빈 익열 끝벽에서의 열(물질) 전달계수 측정," 대한기계학회논문집(B), 제 25권, pp. 356~365.
- (7) 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.