

주기적인 통과후류가 NACA0012 익형 표면에서의 천이 경계층 열전달에 미치는 영향

정하승^{*} · 이준식[†] · 강신형^{**}

(2000년 8월 4일 접수, 2001년 3월 12일 심사완료)

The Effect of Wake-Induced Periodic Unsteadiness on Heat Transfer in the Transitional Boundary Layer Around NACA0012 Airfoil

Ha Seung Chung, Joon Sik Lee and Shin-Hyoung Kang

Key Words: Periodic Wake(주기적인 후류), NACA0012 Airfoil(익형), Unsteadiness(비정상), Transitional Thermal Boundary Layers(천이 열경계층)

Abstract

Heat transfer data are presented which describe characteristics of the transitional thermal boundary layers on the NACA0012 airfoil with upstream wakes. The wakes are generated periodically by circular cylindrical rods which rotate around the airfoil like a squirrel cage. The unsteady wakes simulate those produced by the upstream rotating blade rows in axial turbomachines. The pressure or suction side of the airfoil is also simulated according to the rotating direction of circular rods. As the Reynolds number and the number of rotating rods increase, the boundary layer transition occurs earlier and the Nusselt number increases. The difference of heat transfer coefficient is less on the pressure side than on the suction side. At a constant Reynolds number, the Nusselt number is larger and smaller, respectively, before and after transition as the Strouhal number increases.

St : Strouhal수(= $2\pi nL\omega / 60U_\infty$)

C_f : 벽마찰 계수

C_p : 압력 계수

그리스문자

ω : 회전봉의 속도(rpm)

ν : 동점성계수(m^2/s)

기호설명

L : 익형의 코드길이(m)

h : 열전달계수(W/m^2K)

k : 공기의 열전도계수(W/mK)

X : 익형의 표면을 따른 좌표(m)

y : 익형의 양력방향 좌표(m)

n : 회전봉의 개수

U_∞ : 주유동 속도(m/s)

U_m : 평균 속도(m/s)

Nu : Nusselt수(= hL/k)

Re_L : 익형의 코드 길이를 기준으로 한 Reynolds수(= $U_\infty L / \nu$)

1. 서론

각종 터보기계의 내부유동에서 천이 경계층은 유체역학적 성능과 열전달, 소음, 기계 진동 등에 큰 영향을 미치기 때문에, 익형 위에서 발생하는 경계층 천이 과정의 예측을 공학적으로 중요한 문제로 대두되고 있다. 많은 공학적인 응용분야에서 비정상 경계층 유동의 예를 찾을 수 있으며, 특히 축류 터보기계에서는 동익과 정익간의 상호작용에 의한 비정상 상태의 천이 경계층이 존재한다. 축류 터빈이나 압축기에서 날개 위의

* 서울대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : jslee@gong.snu.ac.kr

TEL : (02)880-7117 FAX : (02)883-0179

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

유동은 선단에 위치한 익렬의 후류로 인해 주기적인 비정상 상태로 나타나는데, 이러한 후류는 캐스케이드 채널을 지나면서 경계층의 발달, 특히 천이 과정에 커다란 영향을 미친다. 하지만 경계층 유동에는 박리, 박리 후 재부착, 층류에서 난류로의 천이, 비평형 난류 경계층의 발달 등 복잡한 현상들이 포함되어 있고, 실제 터보기계 내부의 복잡한 형상 및 공간적 제약 등으로 인해 이러한 현상이 발생할 때의 유동장 및 온도장의 정밀한 예측이 힘들다. 따라서 평판 유동이나 캐스케이드 풍동에서의 실험을 통해 여러가지 현상들을 파악하고 이를 실제 설계 및 성능 해석에 적용하고 있다.

지금까지의 연구동향을 살펴보면 크게 정상상태에서의 유동 및 온도측정, 비정상상태에서의 유동측정 그리고 열전달계수의 측정으로 분류할 수 있다. Rued와 Wittig⁽¹⁾은 정상상태 하에서 주유동의 난류강도와 압력구배의 영향을 연구하였고, Hodson⁽²⁾은 비정상상태의 축류터빈에서 압력면과 흡입면에서의 비정상속도장을 측정하였으며, Doorly와 Oldfield⁽³⁾는 확장된 크기(large scale)의 터빈 동익에 대한 실험을 행하여 원봉의 후류가 정익에서의 후류와 같은 속도삼각형을 가짐을 보였다. Renoud와 Howard⁽⁴⁾는 익형의 경계층 천이에 대한 통과후류의 영향을 연구하였고, Du 등⁽⁵⁾과 Han 등⁽⁶⁾은 여러 가지 조건에서 후연 제트(trailing edge jets)와 비정상 후류의 복합적 영향 하에서의 터빈블레이드의 열전달계수를 열전대와 액정을 이용하여 측정하였다. Pfeil 등,⁽⁷⁾ Liu와 Rodi,⁽⁸⁾ 그리고 Orth⁽⁹⁾ 등은 회전하는 원봉에 의해 발생하는 주기적인 후류가 평판 위를 지나가면서 생성하는 천이 경계층을 단순화하여 실험하였고, Mayle⁽¹⁰⁾는 가스터빈 엔진의 천이경계층의 역할과 지금까지의 연구 현황을 다각적인 면에서 자세히 소개하고, 이후의 연구 방향을 제시하고 있다. 본 연구에서는 Liu와 Rodi⁽⁸⁾의 실험 방법을 도입하여 다람쥐 칫바퀴 형상의 후류 발생기를 익형의 선단에 회전시켜 주기적인 통과 후류를 발생시켰으며 2차원 유동으로 압력 구배의 영향을 고려하지 않음과 캐뎀이 없어 대칭성을 가지는 NACA0012 익형을 선택하여 사용하였다. 하지만, 익형을 칫바퀴의 내부에 장치함으로써 2차 후류의 영향을 고려할 필요가 없도록 하였다.

본 연구의 선행 연구로서 이현구⁽¹¹⁾는 NACA

0012 익형 위 천이 경계층의 유동 특성을 연구한 바 있다. 익형간 거리와 유속을 변화시켜 가며, 익형 표면의 벽마찰 계수 분포, 경계층 내부의 평균속도 분포 그리고 속도 난류량 등을 측정하였다. 그리고 박태춘⁽¹²⁾은 주기적으로 발생하는 후류 하에서의 유동의 비정상 천이 경계층에 대해 연구하였는데 정상후류와 비정상 후류에 대한 고찰, 익형표면의 정압 분포, 후류에 의한 교란이 없을 때와 주기적으로 발생하는 후류에 의한 교란이 존재할 때의 경계층의 평균속도 분포와 벽마찰 계수 분포 등의 난류량의 예측에 중점을 두었다. 이는 열전달 현상을 정확히 이해하기 위한 유동의 이해에 대해 중요한 결과를 제시하고 있다.

본 연구에서는 주기적인 통과후류 내에서의 NACA0012 익형 표면에서의 천이 열경계층의 범위 및 특성이 열전달에 미치는 영향을 고찰하여 터보기계 설계의 기초자료로 확보하려 하였으며 차후로 터보기계 내부 유동 및 열전달 수치모사의 적합성을 검증하는 기본자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 조건

균일 유동 또는 주기적으로 발생하는 통과후류 내의 익형 위 천이 열 경계층의 특성을 연구하기 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 풍동과 후류 발생기, NACA0012 익형, 그리고 측정 기기로 실험장치를 구성하였다.

본 연구에서 사용한 풍동은 익형 실험용으로 제작된 수직 폐쇄순환식 철제 풍동으로, 실험부의 크기는 600(폭) × 2000(길이) × 300(높이) mm이다. 수축부의 비를 8:1로 하고 3/8" 허니콤 1매와 4장의 다양한 크기의 메쉬를 사용하여 실험부의 균일 유동을 안정화시켰다. 실험부의 앞 500 mm는 아크릴로 제작한 직관부이고, 이후 1500 mm는 양 측벽이 각각 25 mm까지 더 벌어져 풍동 측벽 위의 경계층에 의한 차폐효과를 보상할 수 있도록 제작하였다. 풍동의 바닥면은 두랄루민 판으로 만들었고, 양측벽과 천장은 뼈대만 철제앵글로 만들고 그 외는 아크릴 판으로 만들어 내부가 보이도록 하였다. 실험부 중앙 바닥면에는 직류전동기로 회전시키는 지름 560 mm의 원

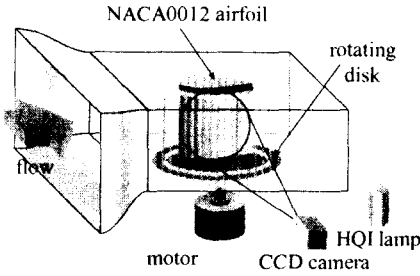


Fig. 1 Schematic of the test section

형 디스크가 있는데, 그 테두리(지름 540 mm)에는 지름 3 mm, 길이 30 mm의 원형실린더를 꿰는 구멍 24개를 뚫어 원봉에서 발생하는 후류의 발생주기를 조절할 수 있도록 하였다. 또한 디스크의 회전속도 및 방향을 바꿈으로써 다른 형상의 후류를 발생시킬 수도 있다. 시험부 중앙의 상부에는 익형을 부착할 수 있도록 제작한 아크릴판을 설치하였다. 시험부 하류에는 확산각 7°인 디퓨저를 설치하여 정압손실을 최소화하였다. 풍동에 장치된 송풍기는 축류식으로서, 인버터를 통하여 0~50 m/s까지 연속적인 속도 조절이 가능하다. 풍동의 성능을 알아보기 위하여 풍동의 길이방향과 높이방향의 속도를 측정하였다. 속도는 5상 스텝모터, 볼 베어링 그리고 리니어 베어링으로 구성된 자동 이송장치 및 1형 열선 프로브(Dantec 55P15)를 사용하여 측정하였다.

실험부에 설치한 익형은 캠버가 없는 NACA0012 익형이다. 기존의 여러 경계층 연구와 실험들이 평판에서 수행되었지만, 실제 터보기계에서는 압력구배를 가진 날개를 사용하고 있기 때문에 그 유동현상을 해석하는 기본 모델로는 NACA0012 익형이 적합하다고 판단하였다. 또한 NACA0012 익형은 형상이 잘 알려진 기본 익형이고, 수치계산에도 적합하다. 익형의 코드길이는 풍동의 유속에 대한 Reynolds수를 고려하여 300 mm로 하였고, 폭은 벽면효과의 영향을 최소화하기 위하여 295 mm로 충분한 길이를 두었다. 익형은 단열을 고려해 나무로 만들었으며 표면을 실리콘 단열테이프로 다시 한번 단열하였다. 이 익형을 시험부의 중앙에 설치하였는데, 익형의 바닥면은 회전할 수 있는 원형 디스크이므로 바닥면에서 5 mm를 띄웠다.

열전달계수를 구하기 위해서는 주유동 온도, 표면 열유속, 표면 온도분포를 알아야 한다. 표면 온도분포는 액정(thermochromic liquid crystal)을 사용하여 측정하였다. 익형 위에 균일 열유속 경계조건을 만들기 위하여 금박막 필름(gold-coated film)을 부착하고 여기에 검정도료(black paint)와 R35C1W의 액정을 도포하였다. 액정은 보정으로 인한 오차를 최대한 줄이기 위하여 1°C의 변색범위를 가지는 것으로 사용하였다. 여기에 DC 전원 공급장치(Samju Electronics Co)를 사용하여 전력을 공급하였으며 이를 다시 멀티미터(Hewlett Packard, HP34401A)로 계속하여 표면 열유속을 계산하였으며, 전력을 변화시켜가며 나타나는 색깔변화에 화상처리기법을 사용하여 표면온도를 구하였다. 주유동 온도는 항온조 내에서 백금저항 온도계를 이용해 교정을 한 열전대(T-type)를 사용해 측정하였으며 자료획득장치(Hydra, 2645A)를 통해 10번 측정된 값을 평균하여 사용하였다.

실험조건으로 주유동의 속도를 10 m/s ($Re_L = 2 \times 10^5$), 20 m/s ($Re_L = 4 \times 10^5$), 30 m/s ($Re_L = 6 \times 10^5$)로 변화시켰으며, 각각의 경우에 대해 회전봉의 개수는 없을 때, 4개, 8개, 12개로 바꾸었다. 또한 봉의 회전속도는 354 rpm으로 고정시키고 회전방향은 시계방향과 시계반대방향으로 변환하며 실험을 수행하였다. 회전방향이 시계방향일 때에는 익형의 흡입면에서 유동방향과 회전봉의 방향이 같게 된다. 주기적 비정상성은 Strouhal수 (St)로 나타낼 수 있는데 이는 다음과 같이 정의하였다.

$$St = \frac{2\pi n L \omega}{60 U_\infty} \quad (1)$$

여기서 n 은 원봉의 개수, L 은 익형의 길이, ω 는 각속도, U_∞ 는 주유동속도이다. 본 연구의 실험조건에서 St 수의 범위는 0 ~ 13.35이다.

오차가 발생할 가능성이 제일 크다고 예상되는 경우는 주유동의 속도가 30 m/s, 회전봉의 개수가 12개인 경우이며 시계방향으로 회전하는 경우에 대해 $X/L = 0.56$ 지점에서 Nusselt수의 불확실성을 해석해보면 금박막필름에서 금도금의 균일도가 가장 큰 불확실성을 가지는 것으로 나타났다. 총 불확실성은 2.19%이다.

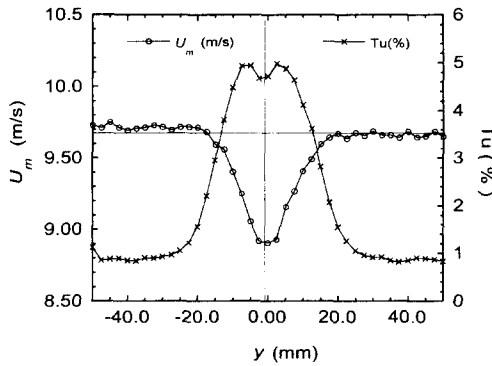


Fig. 2 Mean velocity and turbulence intensity variations of the wake behind NACA0012 airfoil

3. 실험결과 및 검토

3.1 유동결과

본 연구에서는 10 kHz로 10초 동안 자료를 취하였다. 풍동의 성능을 알아보기 위하여 풍동의 길이방향, 높이방향 속도를 측정하였는데, 본 연구에서 사용한 풍동은 평균적으로 시험부의 난류강도가 약 0.5%이고, 평균속도 균일도는 0.4% 정도이다.

Fig. 2는 익형 형상의 정확성을 검증하고 영각이 0°로 잘 맞추어져 있는지 확인하기 위하여 익형을 통과한 후류를 측정된 결과를 보여준다. 중심선을 기준으로 대칭성을 잘 나타내주고 있는 것으로부터 익형이 정확히 제작되었고 영각도 0°로 잘 맞추어져 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 주유동의 속도가 10 m/s일 때, 후류가 없는 경우와 회전봉의 개수가 8개(St = 8.9)인 경우에 평균 마찰계수를 보여주고 있다. 후류가 없는 경우에는 열선풍속계로 측정할 수 있는 범위 내에서 천이가 관찰되지 않았으며, 회전봉의 개수가 8개일 때는 회전봉이 시계방향으로 회전할 때와 반시계방향으로 회전할 때 비슷한 결과를 나타냈다. 그리고, Fig. 4는 회전봉의 개수가 8개인 경우의 압력계수를 나타낸 것이다. 정체점을 약간 벗어난 지점에서부터 값을 비교해 본 결과, 회전방향이 시계방향일 때는 흡입면, 반시계방향일 때는 압력면의 특성을 나타내는 것으로 간주할 수 있다.

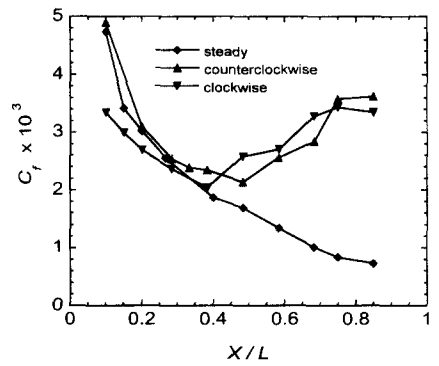


Fig. 3 Friction coefficient distributions at steady state and at St = 8.90

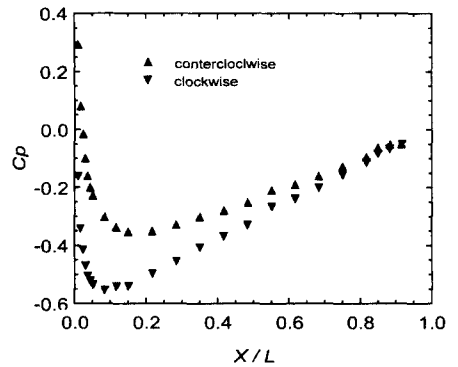


Fig. 4 Pressure coefficient distribution at St = 8.90

3.2 주유동 속도가 천이 열경계층에 미치는 영향

Fig. 5에서 보는 바와 같이 회전하는 원형 실린더의 후류에 의한 천이 열경계층을 조사하기 전에 후류가 없는 경우에 주유동의 속도를 10, 20, 30 m/s로 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

주유동의 속도가 커짐에 따라 Nusselt수의 절대값이 증가하였으며 10 m/s일 때 $X/L \cong 0.75$, 20 m/s일 때 $X/L \cong 0.7$, 30 m/s일 때 $X/L \cong 0.6$ 에서 천이가 시작되었다. 즉 주유동의 속도가 증가함에 따라 천이가 시작되는 지점이 정체점 쪽으로 이동한다. 또한 주유동의 속도가 커짐에 따라 천이가 일어난 후에 Nusselt수의 더욱 급격한 변화가 관찰되었다.

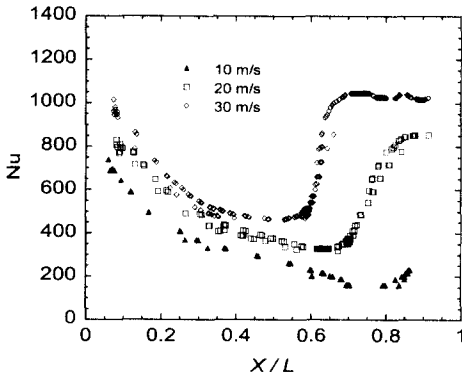
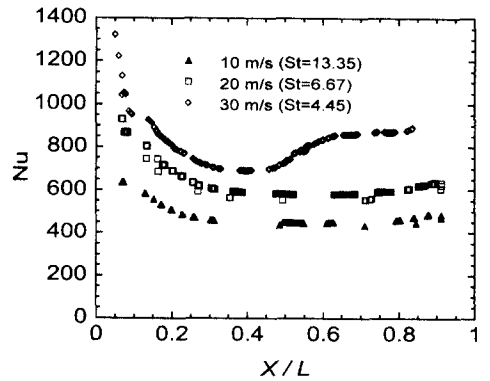
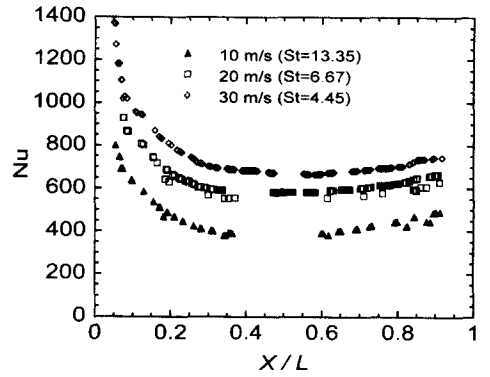


Fig. 5 Nusselt number distributions without wake



(a) Clockwise rotation



(b) Counterclockwise rotation

Fig. 6 Nusselt number distributions with rotation of 12 rods

다음으로는 회전속도를 354 rpm으로 고정하고 회전봉의 개수를 4개, 8개, 12개로 변화시키며 주유동의 속도에 따른 열전달계수의 영향을 살펴 보았다. 이 때 회전방향은 시계방향과 반시계방향으로 바뀌며 실험하였다. 대표적으로 회전봉의 개수가 12개일 때의 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

본 논문에는 그 결과를 제시하지 않았으나 회전봉의 개수가 4개일 때는 Nusselt수의 전체적인 경향이 회전봉이 없을 때와 비슷하였다. 즉 주유동의 속도가 커질수록, Strouhal수가 작아질수록 천이가 더 빨리 일어남을 볼 수 있었으며 Nusselt수의 절대값 또한 커짐을 관찰할 수 있었다. 회전봉의 개수가 8개, 12개일 때도 같은 경향을 보였다. 그러나 회전봉의 개수가 8개, 12개일 때는 천이 발생 전후의 변화의 정도가 더욱 완만해져 주유동 속도가 20 m/s, 30 m/s일 때는 천이가 일어나는 지점이 명확하게 나타나지 않았다.

3.3 후류의 주기의 영향

주유동의 속도가 일정할 때 회전봉의 개수 또는 후류의 주기가 익형표면의 열전달에 미치는 영향을 고찰하였다. 주유동의 속도가 10, 20, 30 m/s인 경우들에 대하여 실험하였으나 본 논문에는 대표적으로 주유동의 속도가 30 m/s일 때의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전체적으로 회전봉의 개수가 많아질수록 즉 Strouhal수가 커질수록 Nusselt수의 절대값이 커지며 천이도 더 빨리 일어남을 관찰할 수 있었다. 그러나 이러한 경향은 앞에서 제시한 회전봉의 개수를 고정하고 주

유동의 속도를 바꿔가며 한 실험결과 보다는 차이가 적었다. 이로부터 회전봉의 개수 보다는 주유동의 속도가 열전달계수에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 주유동의 속도가 10 m/s인 경우에서 회전봉이 없는 경우 $X/L \cong 0.75$ 에서 천이점이 명확하게 관찰되지만 회전봉을 설치하면 천이점의 위치가 불분명해진다. 회전봉의 개수가 4개, 8개, 12개로 많아지면서 Nusselt수의 절대값에 약간의 증가를 보일 뿐 전체적인 경향에는 큰 차이가 없었다. 그러나 주유동의 속도가 20 m/s인 경우부터 이러한 경향은 변하기 시작했다. 주유동 속도가 10 m/s일 때 천이점을 거의 찾을 수 없었던 것과는 달리 회전봉의 개수가 4개일 때까지는 천이가 일어난다고 생각되는 지점을 식별할 수 있었다. 또 이 지점은 회전봉이 없을 때 보다 정

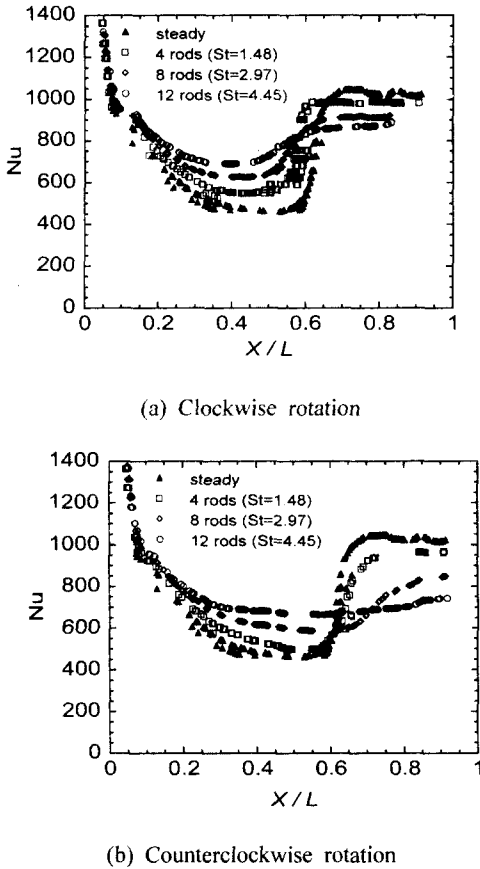


Fig. 7 Nusselt number distributions with wake at $U_{\infty} = 30$ m/s

체점에 더 가까운 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 주유동의 속도가 30 m/s일 때는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 더욱 뚜렷한 차이를 나타내었다. 이는 주유동의 속도가 커질수록 경계층의 두께가 얇아져 회전봉 개수의 영향이 더욱 커지는 것으로 생각할 수 있다. 회전봉의 개수가 많아질수록, Strouhal수가 커질수록 천이가 더 빨리 일어나며 Nusselt수의 값을 보면 천이가 일어나기 전에는 더 컸지만 천이가 일어난 후에는 다시 작아지는 경향을 볼 수 있었고 변화의 정도도 더 완만했다. 이는 앞서 회전봉의 개수가 일정할 때 주유동의 속도에 따른 경향과 일치하였다. 이는 천이가 일어나는 지점과 난류 열 경계층두께의 차이로 설명할 수 있다. 즉, 주유동의 속도가 일정할 때, 회전봉의 개수가 증가함에 따라 천이가 더

빨리 일어나게 되는 것을 관찰할 수 있는데 천이가 일찍 일어나며 따라 난류 열경계층 역시 일찍 발달하면서 천이점 후 임의의 X/L 값에서 회전봉의 개수가 많을수록 열경계층 두께가 더 두꺼워 열전달계수가 작아지는 것으로 생각된다.

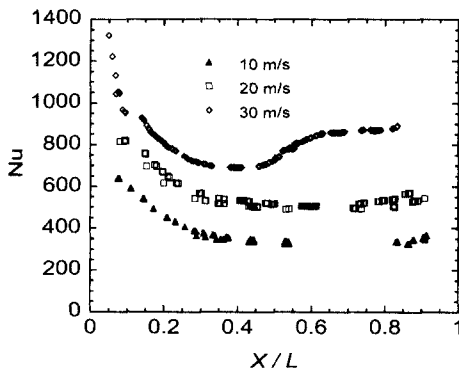
3.4 회전봉 회전방향의 영향

회전봉이 반시계방향으로 회전할 때가 시계방향으로 회전할 때 보다 더욱 완만한 변화를 보였는데 이는 회전봉의 회전방향에 따라 후류의 방향이 다르므로 익형 표면의 열전달계수에 미치는 영향의 차이를 보여준다. Han 등⁽⁶⁾의 결과를 보면 압력면에서 흡입면에 비해 완만한 경향을 보이고 본 연구의 경향과도 일치한다. 즉, 시험면이 회전방향이 시계방향일 때는 후류에 대해 흡입면 역할을, 반시계방향에 대해서는 압력면 역할을 하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 반시계방향으로 회전할 때 시계방향으로 회전할 때 보다 더욱 완만한 경향을 보이는 것은 압력면의 특성을 보이는 것으로 분석할 수 있다. 이것은 같은 익형에 대해 유동실험을 수행하여 압력계수를 측정된 Fig. 4의 결과에서도 확인할 수 있다. 즉 시계방향으로 회전할 때와 반시계방향으로 회전할 때의 압력계수를 비교해 볼 때 시계방향으로 회전할 때는 흡입면의 특성을 반시계방향으로 회전할 때는 압력면의 특성을 나타내고 있다.

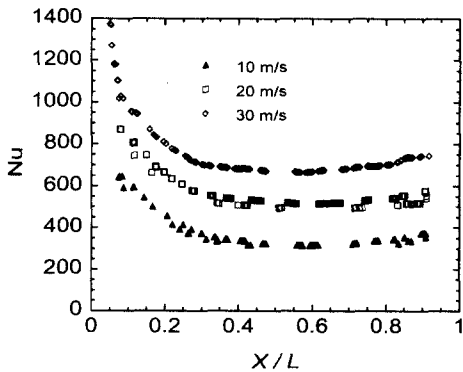
3.5 Strouhal수가 천이 열경계층에 미치는 영향

앞에서 보는 바와 같이 회전봉의 개수가 일정할 때는 Strouhal수가 감소할수록, 주유동의 속도가 일정할 때는 Strouhal수가 증가할수록 Nusselt수가 증가하는 경향을 보였다. 회전봉의 개수가 일정할 때 더 큰 Strouhal수에 해당하는 느린 주유동의 속도 즉 더 작은 Reynolds수를 가지는 유동이 익형위 열전달계수에 더 작은 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다. 이는 회전봉을 통과한 더 느린 후류가 작은 Reynolds수를 가지는 유동에 의해 생성된 두꺼운 경계층에 미치는 영향이 작기 때문으로 생각할 수 있다. 그러나 일정한 Reynolds수 하에서는 Strouhal수가 커짐에 따라 익형위 열전달계수가 커지는 경향을 보인다.

이는 주유동의 속도가 일정할 때 회전봉의 개수가 증가함에 따라 후류의 주기가 커지므로 열전달계수가 커지는 것이다. 그러므로 Strouhal수의



(a) Clockwise rotation



(b) Counterclockwise rotation

Fig. 8 Nusselt number distributions at $St = 4.45$

효과는 일정한 Reynolds수 하에서만 의미가 있다고 할 수 있다. 또한 같은 Strouhal수에 대해서는 주유동 속도에 대해 경향은 같으나 Nusselt수의 절대값이 주유동의 속도가 커질수록 큰 값을 가짐을 관찰할 수 있었다. 그러나 회전방향이 시계 방향으로 회전할 때 즉, 흡입면에서는 주유동의 속도가 30 m/s인 경우 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 조금 다른 경향을 보이는데 이는 Strouhal수보다는 Reynolds수가 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 즉 회전봉의 개수보다는 주유동의 속도가 더 큰 영향을 미친다. 그리고 여기서도 회전봉을 통과한 비정상 후류가 흡입면 보다는 압력면에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Strouhal수 역시 Reynolds수와 함께 비정상 후류하에서 익형위 열전달계수에 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 주유동의 속도를 10, 20, 30 m/s로, 회전봉을 없을 때와 4개, 8개, 12개로 바꿔가며, 회전봉의 시계방향과 반시계방향의 회전에 대해 NACA0012 익형 표면의 열전달계수를 측정하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 회전봉의 개수가 고정되어 있을 때 주유동 속도가 증가함에 따라 즉 Strouhal수가 감소할수록, 천이가 더 일찍 일어났고 열전달계수가 증가하였으며 천이가 일어난 후에 Nusselt수의 더욱 급격한 변화가 관찰되었다.

(2) 주유동 속도가 일정할 때 회전봉의 개수가 많아질수록 즉 Strouhal수가 커질수록 열전달계수가 증가하고 천이도 더 빨리 발생하였으며 Nusselt수의 값을 보면 천이가 일어나기 전에는 더 컸지만 천이가 일어난 후에는 같은 지점에 대해 다시 작아지는 경향을 볼 수 있었다. 또 천이 발생 직후에서의 변화의 정도도 더욱 완만하였다.

(3) 시계방향과 반시계방향의 회전에 대해 압력계수와 Nusselt수의 변화를 보면 회전방향이 시계방향일 때는 시험면이 흡입면의 특성을, 반시계방향일 때는 압력면의 특성을 나타냈다. 또한, 압력면에서 흡입면에 비해 열전달계수의 변화가 완만하였다.

(4) 회전봉의 개수가 일정할 때는 Strouhal수가 감소할수록, 주유동의 속도가 일정할 때는 Strouhal수가 증가할수록 Nusselt수가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 Strouhal수의 효과는 일정한 Reynolds수 하에서만 의미가 있다고 생각된다.

후 기

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며 일부는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Rued, K and, Wittig, S., 1986, "Laminar and Transitional Boundary Layer Structures in Accelerating Flow with Heat Transfer," *Journal of*

- Turbomachinery*, Vol. 108, pp. 116~123.
- (2) Hodson, H. P., 1985, "Measurements of Wake-Generated Unsteadiness in the Rotor Passages of Axial flow Turbines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 467~476.
- (3) Doorly, J. J. and Oldfield, M. L. G., 1985, "Simulation of Wake-Passing in a Stationary Turbine Rotor Cascade," *ASME Journal of Propulsion and Power*, Vol. 1, pp. 316~318.
- (4) Renoud, R. W. and Howard, R. M., 1990, "Airfoil Boundary-Layer response to an Unsteady Turbulent Flowfield," *AIAA Journal*, Vol. 28, pp. 1894~1990.
- (5) Du, H., Ekkad, S., Han, J.-C., 1997, "Effect of Unsteady Wake with Trailing Edge Coolant Ejection on Detailed Heat Transfer Coefficient Distributions for a Gas turbine Blade," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 119, pp. 242~248.
- (6) Han, J.-C., Zhang, L. and Ou, S., 1993, "Influence of Unsteady Wake on Heat Transfer Coefficient from a Gas turbine Blade," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 904~911.
- (7) Pfeil, H., Herbst, R. and Schroder, T., 1983, "Investigation of the Laminar-Turbulent Transition of Boundary Layers Distributed by Wakes," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 105, pp. 130~137.
- (8) Liu, X. and Rodi, W., 1991, "Experiments on Transitional Boundary Layers with Wake-Induced Unsteadiness," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 231, pp. 229~256.
- (9) Orth, U., 1993, "Unsteady Boundary Layer Transition in Flow Periodically Disturbed by Wakes," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 115,
- (10) Mayle, R. E., 1991, "The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 509~537.
- (11) 이현구, 1998, "후류 내의 익형 위 천이 경계층의 유동 특성," 서울대학교 공학박사 학위논문.
- (12) 박태춘, 1999, "주기적 후류 내의 익형 위 비정상 천이 경계층에 관한 실험적 연구," 서울대학교 공학석사 학위논문.