

와동 발생기 높이 변화에 대한 경계층 내의 유동장과 온도장에 관한 실험적 연구

권수인* · 양장식** · 이기백†
(2001년 3월 15일 접수, 2001년 10월 19일 심사완료)

The Experimental Study of the Interaction Between the Flow and Temperature Field and a Boundary Layer Due to a Variety of the Height of a Vortex Generator

Su-In Kwon, Jang-Sik Yang and Ki-Baik Lee

Key Words: Vortex Generators(와동 발생기), Half Delta Wing(반삼각익), Thermochromatic Liquid Crystal(액정), Five-Hole Pressure Probe (5공 프로브), Vortex Pair(와동쌍)

Abstract

The effects of the interaction between the flow and temperature field and a boundary layer due to a variety of the height of a vortex generator are experimentally investigated. The test facility consists of a boundary-layer wind tunnel with the vortex generator protruding from the bottom surface. In order to control the strength of the longitudinal vortices, the angle of attack and the spacing distance of the vortex generator are 20 degree and 40 mm, respectively. The height of the vortex generator (H) is 15 mm, 20 mm and 30 mm and the cord length of it is 50 mm. Three-component mean velocity measurements are made using a 5-hole probe system and the surface temperature distribution is measured by the hue capturing method using thermochromatic liquid crystals. By using the method mentioned above, the following conclusions are obtained from the present experiment. The boundary layer is thinned in the downwash region where the strong downflow and the lateral outflow of the boundary layer fluid occur and thickened in the upwash region where the longitudinal vortex sweeps low momentum fluid away from the bottom surface. In case that the height of the vortex generator increases, the averaged circulation and the maximum vorticity of the vortex pair decrease. The contours of the non-dimensional temperature show the similar trends for all the cases ($H=15$ mm, 20 mm and 30 mm). The peak augmentation of the distribution of the local non-dimensional temperature occurs in the downwash region near the point of minimum boundary-layer thickness.

기호설명

d : 와동 발생기 사이의 거리
 D : 비디오 카메라와 시험부 사이의 거리
 H : 와동 발생기의 높이
 L : 와동 발생기의 코드 길이

U_{∞} : 자유유동속도(freestream velocity)

X : 유동방향의 좌표

Y : 수평방향의 좌표

Z : 수직방향의 좌표

δ : 경계층 두께

δ^* : 배제 두께

α : 비디오 카메라와 조명이 이루는 각

β : 영각(angle of attack)

θ : 무차원 온도(non-dimensional temperature)

Γ : 평균순환(average circulation)

ω_x : 주유동방향 와도(streamwise vorticity)

* 부산대학교 일반대학원 기계공학과
** 회원, 부산대학교 기계기술연구소
† 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
E-mail : hopelee@hyowon.pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2300 FAX : (051)512-5236

1. 서론

와동 발생기(vortex generator)에서 발생된 종방향 와동(longitudinal vortex)은 경계층과의 상호작용으로 인해 유동 특성을 변화시키며, 실제 공학적인 관심대상이 되는 내·외부 유동에서 유·무의한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

외부유동에서 와동 발생기는 비행체의 날개 윗면에 가로 방향으로 설치되어 저속 비행시 안정성을 확보할 뿐만 아니라 비행 중 영각(angle of attack)의 증가로 인해 발생하는 유동박리를 억제함으로써 실속 부근에서의 비행 임계성능을 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 내부 유동의 경우, 열교환기 내부에 와동 발생기를 설치함으로써 경계층 발달을 억제할 뿐만 아니라 열전달 향상에도 지대한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.

이와 같은 와동 발생기에 관한 기존 연구 결과를 살펴보면 다음과 같다.

Fiebig⁽¹⁾은 주유동방향에 대해 45° 영각을 갖는 사각형 와동 발생기와 리브(rib) 형 와동 발생기를 사용할 경우, 종방향의 와동의 경우가 횡방향 와동에 비해 유동손실이 적고 열전달 효과가 크게 나타난다고 하였다. Reichert 등⁽²⁾은 S 덕트 내에서 와동 발생기의 위치와 간격, 형상, 배열을 변화시켜 압력과 속도장을 측정된 결과, 와동 발생기의 배열에 따라 전체 압력의 왜곡(distorsion)은 개선되었으나 전압 회복에는 크게 기여하지 못하며 유동 박리영역이 감소된다고 하였다. Wendt 등⁽³⁾은 위시본(wishbone) 형상의 와동 발생기 높이의 변화에 따른 난류 경계층과 종방향 와동과의 상호작용에 관한 연구를 수행하였다. 이들의 연구결과에 의하면 벽면 부근에서는 종방향 와동과 가상와동(image vortex)과의 상호작용이 강하게 일어나며 주와동은 벽면에 의해서만 그 순환 값이 소실된다고 하였다. Greber 등⁽⁴⁾은 난류 경계층에서 폭 방향으로 배열된 와동 발생기를 이용하여 하류에서의 와동과 경계층의 상호작용에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 와동 발생기 사이의 설치 간격이 종방향 와동쌍의 순환과 구조를 변화시키는데 지배적인 영향을 미치고 와동 발생기의 배열특성에 따라 종방향 와동이 인접한 종방향 와동쌍에 병합되는 현상을 밝혔다. Pauley 등⁽⁵⁾은 반삼각익(half delta wing) 형상의 와동 발

생기로부터 발생하는 종방향 와동에 대해 많은 연구를 수행하였으며, 와동 발생기의 높이와 영각, 와동 발생기 사이의 간격 등이 종방향 와동과 경계층과의 상호작용에 지대한 영향을 미친다는 연구결과를 제시하였다.

본 연구에서는 벽면으로 향하는 유동에 대해 영각을 20°, 와동 발생기 사이의 간격을 40 mm로 일정하게 유지한 후 와동 발생기의 높이를 15, 20, 30 mm로 변화시켜 와동 발생기 하류에서 발생하는 와동의 구조와 경계층의 성장특성을 5공 프로브를 이용해 측정하였다. 그리고 측정된 데이터를 토대로 색상 포착 기법^(6,7)(hue-capturing technique)을 이용하여 와동 발생기 하류의 표면 온도분포 특성을 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 유동장 측정 실험장치 및 방법

유동장 실험은 아음속 개방형 풍동을 이용하였고, 두께 15 mm의 투명 아크릴로 제작된 직사각형 덕트의 전체 크기는 높이, 폭, 길이가 각각 150, 430, 2000 mm이다. 그리고 시험부의 크기는 150 × 430 × 530 mm이며 수축부의 수축비는 3.5:1이다. 와동 발생기의 설치 위치는 풍동의 수축부 출구에서 1050 mm 떨어진 위치에 설치하였다.

Fig. 1(a)는 본 실험에 이용된 와동 발생기의 형상과 영각 그리고 크기를 나타낸 장치도이다. 주유동방향에 대한 와동 발생기의 영각은 대칭으로 설치된 와동 발생기의 중심선에서 와동 발생기까지의 반시계방향의 각(β)으로 정의하였고 와동 발생기 사이의 거리는 코드길이(L)의 중심간의 간격(d)으로 정의하였다. 와동 발생기의 영각 및 와동 발생기 사이의 거리는 각각 20°, 40 mm로 고정하였다. 또한 와동 발생기의 코드길이는 50 mm이며 와동 발생기의 높이(H)는 각각 15, 20, 30 mm로 하여 3가지 조건에 대해 실험을 수행하였다. 3가지 조건의 와동 발생기에 대해 와동 발생기 후방 100, 150, 200, 300 mm에서 5공 프로브를 이용해 유동장을 측정하였다. 각 측정단면에서 측정위치로 5공 프로브를 이송하기 위해 3축 자동이송장치를 사용하였다. 각 측정단면에서 유동장을 측정하기 위해 두께 15 mm의

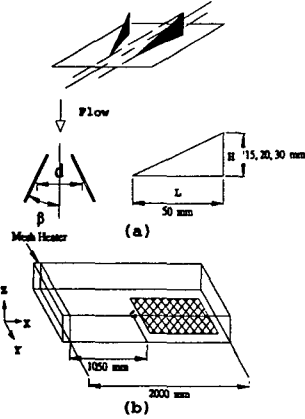


Fig. 1 (a) Vortex generators, (b) Position of vortex generators installed within test section

아크릴에 폭이 5 mm인 홈을 400 mm 길이로 가공하여 5공 프로브를 측정부에 삽입할 수 있도록 하였다. 수평방향 및 수직방향으로 자유롭게 움직일 수 있도록 슬라이딩 가이드 판을 제작하여 측정단면 상의 공기 누수를 최대한 억제하였다.

5공 프로브로부터 측정된 데이터는 각 압력공과 연결된 압력 변환기(FCO 44)로 전달되고 압력 변환기의 압력 데이터는 다 채널 A/D 변환기(PCL-812 PG)를 통해 디지털 신호로 변환되어 PC에 저장된다. 이 때 5공 프로브의 압력 데이터의 오차를 줄이기 위해 각 압력공의 압력 데이터는 500회 8번 측정하여 앙상블 평균하였다. 데이터를 저장한 후 A/D 변환부에서 3차원 자동이송 장치의 스텝핑 모터의 제어부에 디지털 신호를 입력하여 다음 측정 점으로 자동 이송할 수 있도록 하였다. 이와 같은 방법으로 전체 측정단면에 대해 압력 데이터를 구하였고, 5공 프로브의 보정 데이터를 이용하여 속도로 변환하였다. 그리고 측정단면의 벽면 부근에서는 벽면과 5공 프로브의 상호 간섭작용에 의해 왜곡된 속도가 나타나므로 Pauley 등⁽⁵⁾이 제시한 보정방법을 사용하여 벽면 근처의 유동을 보정하였다.

측정단면에서의 압력 측정점은 Z방향과 Y방향으로 벽면과 측벽에서 각각 3 mm, 100 mm 떨어진 위치에 선정하였다. 와동 발생기의 높이가 15 mm 인 경우는 더 조밀한 유동정보를 얻기 위해서 초기에는 Y방향으로 2 mm, 그 이후부터는 4 mm

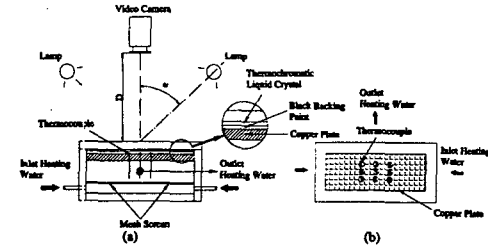


Fig. 2 Schematic diagram of calibration apparatus for local hue versus temperature relation

간격으로 측정하였다. 그리고 Z방향으로는 4 mm 간격으로 측정하였고, 와동 발생기의 높이가 20, 30 mm인 경우에는 Y, Z방향으로 각각 5 mm 간격으로 측정하였다.

2.2 온도장 측정 실험장치 및 보정방법

Fig. 2(a), (b)는 액정의 온도변화에 따른 색상(hue)변화를 측정하기 위해 제작된 보정장치도이다. 보정장치는 균일한 온도분포를 만들기 위해 동판(10 × 50 × 115 mm)을 사용하였고, 항온조(RTE-4)를 이용하여 동판의 온도분포를 균일하게 하였다. 또한 동판의 균일 온도분포를 확인하기 위해 T 형 열전대를 동판 중앙에서 가로와 세로 방향으로 각각 10, 20 mm 간격으로 9개를 설치하였다. 동판 위에 검정페인트(BBG1)를 분무기(air brush)로 균일하게 뿌리고 그 위에 다시 액정(R35C5W)을 균일하게 뿌린 후에 보정실험을 수행하였다. 보정실험은 광원 이외의 모든 광을 차단하기 위해 암실에서 수행하였으며 보정장치는 실제 실험조건과 동일한 위치에 설치하였다. 보정장치와 비디오 카메라와의 거리(D)는 700 mm이며 광원으로 사용된 두 개의 20W의 삼파장 램프와 보정판이 이루는 각(α)은 60°로 고정하였다. 온도와 액정의 색상변화를 동시에 측정하기 위해 비디오 카메라와 표준온도계(Omega, DP41-TC)를 사용하였고 이 온도계의 분해능은 0.01°C이며 정확도는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이다.

보정실험은 각기 다른 시간에서 9회 측정하였고 획득된 데이터는 먼지나 이물질 등에 의한 오차를 줄이기 위해 3 × 3 화소(pixel)에 대하여 미디언 필터링(median filtering)으로 처리하여 앙상블 평균하였다. Fig. 3은 앙상블 평균 처리한 색상

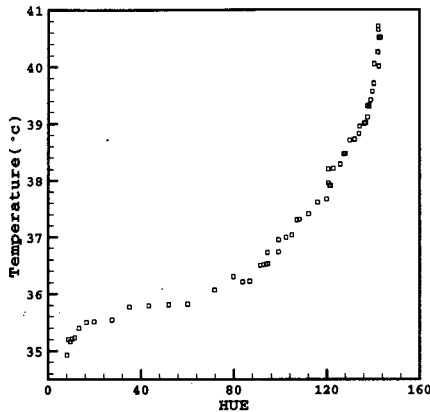


Fig. 3 Local hue versus temperature relation

대 온도의 변화를 나타낸 보정 데이터이고, 이 데이터를 이용해 식 (1)과 같은 보정 곡선식을 구하였다.

$$T = 34.7143 + HUE \times 5.375 \times 10^{-2} - HUE^2 \times 8.571 \times 10^{-4} + 5.233 \times 10^{-6} \times HUE^3 \quad (1)$$

스테인레스 박판(stainless foil)이나 금박 필름(gold coated film)을 사용한 균일 열유속(uniform heat flux)으로 표면 온도장에 대한 실험을 할 경우, 박판 또는 금박 필름의 부착시 공기가 접촉면에 유입되기 때문에 공기의 팽창으로 인해 박판과 금박 필름이 벽면에서 이탈하여 정확한 온도분포를 계산할 수 없는 단점이 있다.

본 실험에서는 이를 보완하기 위해 Gillepie 등⁽⁸⁾이 제시한 방법을 이용하였으며, Fig. 4와 같이 시험부의 선단에 메쉬히터(mesh heater)를 설치하여 유입공기를 직접 가열하는 방식(transient method)을 도입하였다.

메쉬히터는 유입공기를 액정이 반응하는 온도 범위까지 올리기 위해 총 용량이 약 20kW 변압기를 사용하였고 입력측에 고/저 전압(high/low voltage)과 출력측에 3개의 권선탭을 사용하여 가열할 온도범위를 조절할 수 있게 하였다. 메쉬히터에 부하를 걸 경우, 고온의 열로 인한 팽창에 견딜 수 있도록 플랜지부분에 내열재인 베켈라이트를 사용하여 단열하였고 그 외측에 아크릴 플랜지를 밀착시켰다. 전류를 통전시키는 구리막대와 그물망(mesh screen)의 접촉을 최대한 유지하고 누수공기를 최대한 억제하도록 설치하였다.

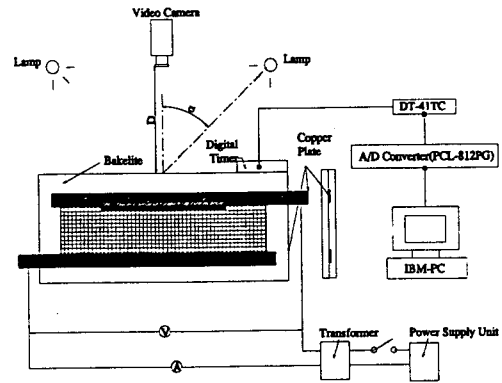


Fig. 4 Schematic diagram of a mesh heater

수축부 입구에서 200 mm 후방에 메쉬히터를 설치하고, Fig. 1(b)와 같이 두께, 폭, 길이가 15 × 430 × 530 mm인 아크릴 판 위에 와동 발생기 후방 30 mm 위치에서부터 400 × 450 mm의 크기로 액정을 분무기로 균일하게 도포한 후, 액정 위에 다시 검정페인트를 균일하게 도포하여 실험을 수행하였다. 실제 실험에서 광원의 각도 (α)와 비디오 카메라와 시험부 사이의 거리 (D)는 보정실험과 동일하게 하였으며, 다른 광원의 영향을 배제하기 위해 암실에서 수행하였다. 와동 발생기의 높이 변화에 따른 표면 온도장을 측정하기 위해 디지털 타이머를 설치하여 메쉬히터가 작동된 동일 시간동안 표면 온도장을 비디오 카메라로 촬영하였다.

3. 실험결과 및 고찰

시험부 내로 유입되는 유동특성을 측정하기 위해 I형 열선 프로브를 사용해 경계층 두께, 평균 속도, 난류강도를 측정하였다. 측정위치는 와동 발생기가 설치된 위치(X=1050 mm)에서 이루어졌으며 측정은 3축 이송장치를 이용해 아래 벽면으로부터 0.1 mm간격으로 5회 측정하여 양상불 평균하였고, 3차 스플라인 곡선적합(cubic spline curve fitting)을 이용해 경계층 두께를 구하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 실험조건 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)는 높이가 15 mm인 경우 X=100 mm에서 2차 유동(secondary flow)의 속도 벡터와 주유동방향 등 속도분포를 같은 영역에 나타내었고, Fig 5(b)는 Fig 5(a)

Table 1 Test Conditions

Boundary layer thickness(δ)	14.27 mm
Displacement thickness(δ^*)	1.41
Momentum thickness(θ)	1.15
Shape factor($H_{\delta^*} = \delta^*/\theta$)	1.22
Reynolds number(Re_X)	1.3065×10^6
Turbulence intensity	0.8%

의 상승영역(a), 와동 중심영역(b), 하강영역(c), 와동과 와동 사이 영역(d)으로 구별하여 각 구간에 대해 주 유동방향 속도변화를 자유유동속도(U_{∞})로 나누어 속도변화의 특성을 나타내었다. 이 경우 유동의 하강영역과 와동과 와동 사이 영역에서는 속도분포의 변화는 거의 없었으나 상승영역에서는 벽면으로 갈수록 낮은 속도분포를 나타내었으며, 와동중심영역에서는 벽면에서 높이방향(Z)으로 증가할수록 와동코어(vortex core)를 기준으로 와동코어 아래 부분은 감속했다가 다시 와동코어 위 부분에서는 가속하는 경향을 보였다.

Fig. 5(c)는 와동 발생기의 높이가 15 mm인 경우, 유동장 내에서 와동의 이동경로를 액정을 이용해 가시화하였다. 유막법(oil film method)을 이용하여 한계유선(limiting streamline)을 가시화하는 방법에 비해 액정을 이용할 경우 와동의 상승영역과 하강영역에서 뚜렷한 색상 차이가 나타나므로 액정을 사용하여 와동의 궤적을 가시화하였다.

Fig. 5(c)의 그림에서 와동 발생기에 의해 생성된 와동쌍의 궤적은 두 와동 사이의 중심축($Y=0$)을 기준으로 와동의 이동경로를 따라 하류까지 대칭으로 나타나고 있다. 백색띠 안쪽에 대칭적으로 검은색 영역이 나타나고 있는데, 이 영역은 시계방향(반시계방향)의 와동이 하강 유동영역에서 재부착(reattachment)되고 와동코어 영역을 통과할 때 발생하는 현상이다. 그리고 좁은 폭의 백색 띠 외측에 검은 부분의 영역이 나타나는데, 이 영역은 상승영역의 박리에 의해 발생하는 현상이다.

3.1 2차 속도벡터

와동 발생기 하류에서 발생하는 유동현상을

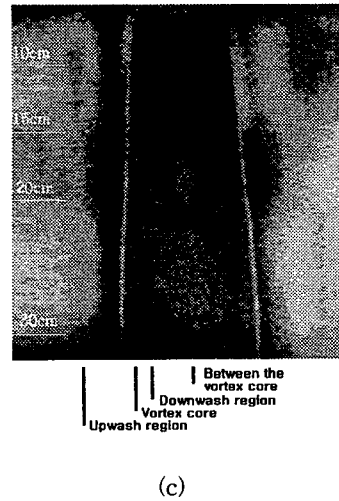
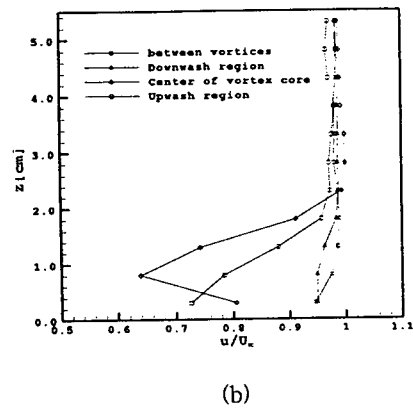
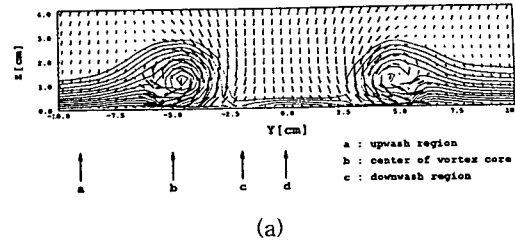


Fig. 5 (a) Normalized streamwise velocity profiles for $H=150$ mm at $X=100$ mm
 (b) Normalized spanwise velocity profiles for Y-positions of -90, -50, -20 and 0 mm at $X=150$ mm and $H=150$ mm
 (c) Limiting streamline on the bottom surface by thermochromatic liquid crystal

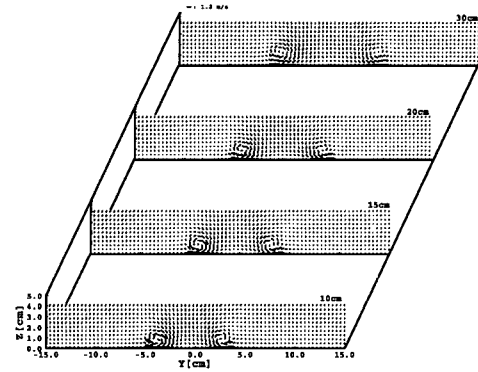
측정하기 위해 양장식⁽⁹⁾이 제시한 5공 프로브 보정기법을 이용해 유동장을 측정하였다.

Fig. 6(a), (b), (c)는 영각이 20°, 중심거리가 40 mm 그리고 와동 발생기의 높이가 15, 20, 30 mm 인 경우에 측정단면 $X=100, 150, 200, 300$ mm에서 2차 속도벡터를 나타낸 것이다. 모든 경우에 대해 와동 발생기에 의해 발생한 와동쌍은 시계방향과 반시계방향으로 회전하며 측정단면의 하류로 이동할수록 와동의 속도벡터 크기가 감소하고 있음을 알 수 있고 와동과 와동사이의 간격이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 난류확산과 각운동량 보존에 의해 하류로 이동할수록 와동의 속도벡터의 크기가 상대적으로 감소하고 또한 종방향 와동과 반대방향 즉, 벽면을 중심으로 종방향 와동과 대칭 위치에 존재하는 가상와동(image vortex)에 의해 벽면 상부의 종방향 와동(실제 와동)을 폭방향($\pm Y$ 방향)으로 이동시키는 영향 때문에 와동과 와동 사이의 거리가 증가하게 된다. 또한 와동 발생기의 높이가 증가할수록 와동과 와동 사이의 거리가 좁아지는 현상을 확인할 수 있다.

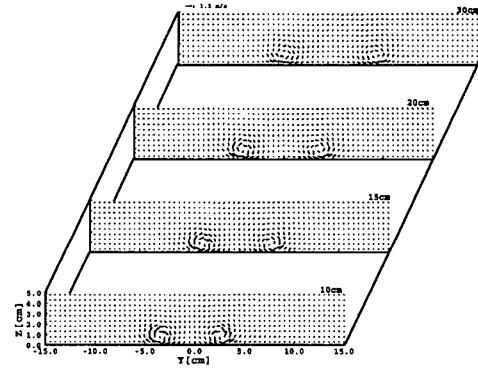
3.2 주유동방향 등 속도분포

Fig. 7(a), (b), (c)는 와동 발생기의 높이(H)가 15, 20, 30 mm일 때, 측정단면 $X=100, 150, 200, 300$ mm에서 주유동방향의 속도를 자유유동속도로 무차원(u/U_∞)하여 0.5~0.99까지 나타낸 주유동방향의 등 속도분포이다.

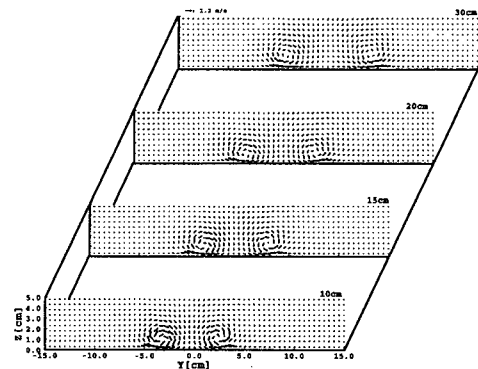
Fig. 7(a), (b), (c)에서 바깥쪽 영역은 자유유동 속도를 의미하기 때문에 그림에서 알 수 있듯이 와동 상호간의 작용은 경계층 두께 변화에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다. 와동과 와동 사이의 영역에서는 경계층 두께가 얇아지나 상승영역에서는 경계층 두께가 두꺼워지는 현상을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 시계방향(반시계방향)의 와동은 고운동량 유체(high momentum fluid)이기 때문이다. 즉, 시계방향(반시계방향)의 와동은 와동과 와동 사이의 경계층 내의 저운동량 유체(low momentum fluid)를 하강유동에서 와동코어 영역으로 이동시키고 그리고 와동코어 영역을 지나 상승영역으로 이동시키는 역할을 하기 때문에 유동이 벽면으로 향하는 하강영역에서는 경계층이 얇아지고 유동이 벽면으로부터 멀어지는 상승영역에서는 경계층이 증가하게 된다. 하류로 이



(a) $H=15$ mm



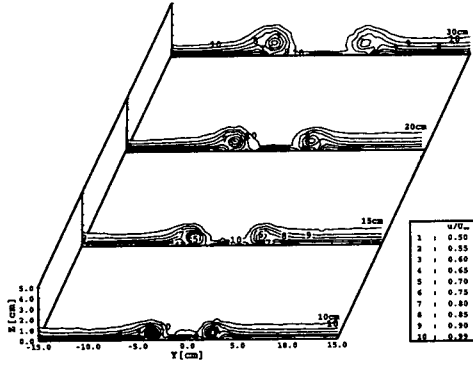
(b) $H=20$ mm



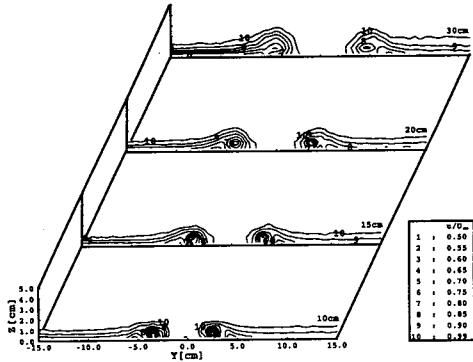
(c) $H=30$ mm

Fig. 6 Secondary velocity vectors

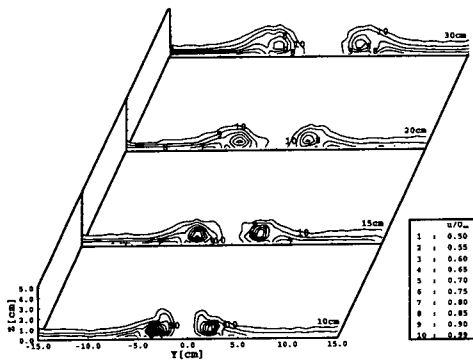
동할수록 와동과 와동 사이의 간격은 증가하고 난류확산과 각운동량 보존에 의해 와동의 형상은 커지게 된다. 또한 와동 발생기 바로 뒷전(trailing edge)에서 발생하는 와동 코어의 생성위치는 와동 발생기의 높이가 증가할수록 폭의 중심방향($Y=0$)을 향해 이동하고 벽면에서 높이(Z) 방향으



(a) H=15 mm



(b) H=20 mm



(c) H=30 mm

Fig. 7 Streamwise velocity contours($u/U_{\infty}=0.99, 0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50$)

로 상승하게 된다. 따라서 와동 발생기의 높이가 증가할수록 와동과 와동 사이의 간격의 감소로 인해 와동 발생 초기에 와동간의 상호작용이 강하게 작용하기 때문에 그림에서 알 수 있듯이

와동 발생기의 높이가 증가할수록 와동의 형상은 폭방향으로 확대된 타원형 형상으로 나타났고 하류로 이동할수록 폭방향으로 더욱더 확대된 타원형 형상을 유지하였다.

3.3 주유동방향 등 와도분포

주유동방향의 등 와도분포는 각 측정단면 ($X=100, 150, 200, 300$ mm)에서 5공 프로브로 측정된 압력 데이터와 5공 프로브의 보정 데이터를 이용해 3차원 속도성분으로 계산한 후에 식(2)의 주유동방향의 와도(streamwise vorticity)의 정의식을 이용해 주유동방향의 와도를 계산하였다.

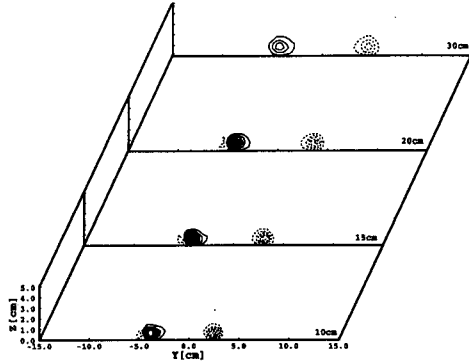
$$\omega_x = \left(\frac{\partial w}{\partial Y} - \frac{\partial v}{\partial Z} \right) \quad (2)$$

식 (2)를 이용한 주유동방향의 와도 값은 각 측정단면의 경계에서는 2차 정확도를 갖는 중앙차분식을 이용하였고, 각 측정단면의 경계 내부 영역에서는 4차 정확도를 갖는 중앙차분식을 사용하여 구하였다.

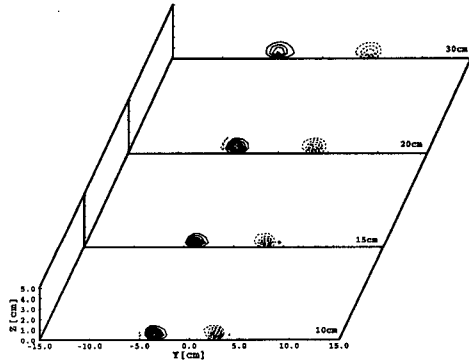
Fig. 8(a), (b), (c)는 자유유동속도에 대한 주유동방향 와도를 등 와도성분($\pm 0.1 \sim 0.6$)으로 각 측정단면에서 나타낸 것이다.

주유동방향의 등와도 성분에서 알 수 있듯이 하류로 이동할수록 와동과 와동 사이의 상호작용은 아주 약하게 작용한다. 그리고 와동 발생기의 높이가 증가할수록 와동 발생기 하류에서 발생하는 와동코어의 형상은 폭방향으로 더욱더 확대된 타원형 형상을 유지하였다. 이는 와동 발생기의 높이가 증가할수록 와동 발생기 바로 뒷전에서 발생된 초기의 와동과 와동간의 상호작용이 상대적으로 강하게 작용하기 때문에 발생하는 것으로 여겨진다. 또한 본 연구의 결과는 한동주⁽¹⁰⁾의 연구결과와 유사한 경향을 보였고, Westphal 등⁽¹¹⁾의 연구에 의하면 반삼각익이 하나만 설치되어 있는 경우에도 이와 같은 현상이 발생된다고 하였다. 그리고 와동과 벽면의 점착조건에 의해 벽과 주와동(primary vortex) 사이에 반대 부호의 2차 와동(secondary vortex)이 존재하였고, 이 2차 와동은 주와동에 의해 소산되어 와동의 상승영역으로 이동함을 알 수 있다. 그러나 2차 와동이 주와동으로 권입(rolling up)되는 현상은 관찰할 수 없었다.

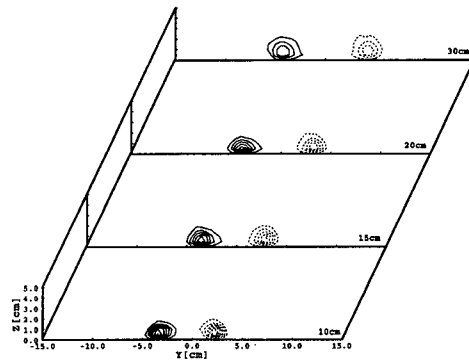
Fig. 9 (a), (b)는 와동 발생기의 높이 변화에 대



(a) $H=15$ mm



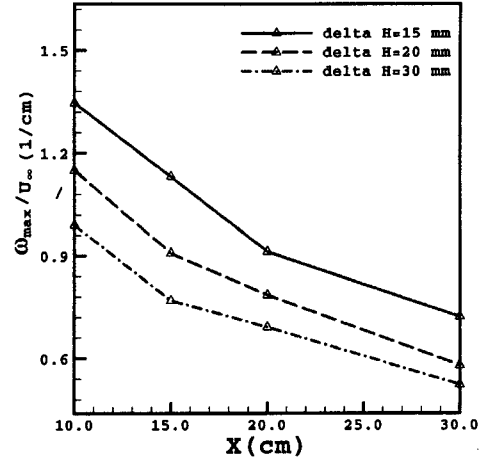
(b) $H=20$ mm



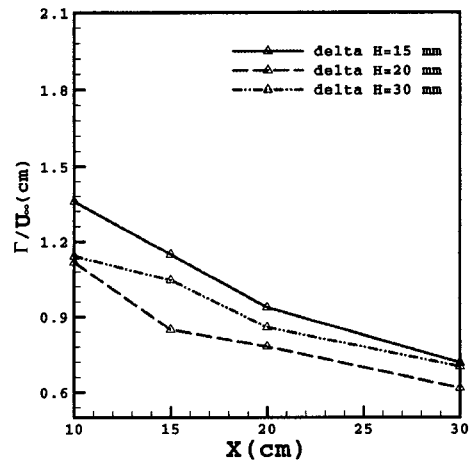
(c) $H=30$ mm

Fig. 8 Streamwise vorticity contours ($\omega_x/U_\infty = \pm 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 0.55, 0.6$ [1/cm] solid line : positive value, dotted line : negative value)

해 각 측정단면인 $x=100, 150, 200, 300$ mm 지점에서의 자유유동속도에 대한 주유동방향의



(a)



(b)

Fig. 9 (a) Streamwise decay of peak vorticity for $H=15, 20, 30$ mm

(b) Streamwise decay of the averaged circulation for $H=15, 20, 30$ mm

최대 와도의 비($\frac{\omega_{max}}{U_\infty}$)와 평균순환 값의 비(Γ/U_∞)로 나타낸 그림이고 평균순환 값(Γ)은 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 구하였다.

$$\Gamma_i = \oint_{path} \vec{V} \cdot d\vec{s} = \int_A \omega_x dA \approx \sum \Gamma_{i,j} \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{\sum_i \sum_j \Gamma_{i,j} \Delta Y_i \Delta Z_j}{\sum_i \sum_j \Delta Y_i \Delta Z_j} \quad (4)$$

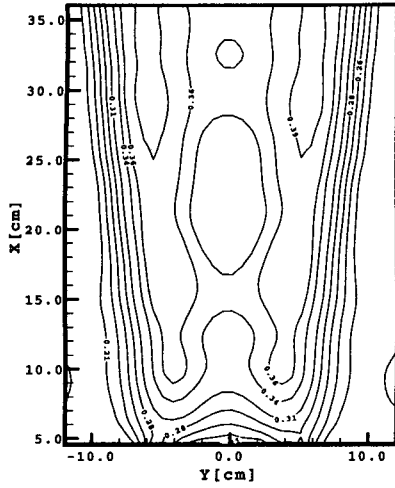


Fig. 10 Contours of non-dimensional temperature for $H=15$ mm

여기서 ΔY_i , ΔZ_j 는 각각 Y 와 Z 방향의 측정점의 간격을 의미하고, $\Gamma_{i,j}$ 는 각 측정점에서의 순환 값을 의미한다.

Fig. 9(a), (b)에서 알 수 있듯이 와동 발생기의 높이가 증가할수록 최대 와도와 평균순환 값은 하류로 이동할수록 감소하였다. 이는 하류로 이동할수록 와동과 와동간의 상호작용은 약해지는데 반면에 와동과 경계층간의 상호작용이 더 강하게 발생하기 때문에 최대 와도 및 평균순환 값이 감소하는 것으로 여겨진다. Fig. 9(a)에서 와동 발생기의 모든 높이에 대해 각 측정단면에서의 최대 와도는 일정하게 감소하는 경향을 보였고, 와동 발생기의 높이가 증가할수록 최대 와도의 값들이 감소함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9(b)에서도 역시 와동 발생기의 높이가 증가할수록 평균순환 값의 변화도 최대 와도와 비슷한 경향을 보이고 있다. 본 실험의 경우 와동 발생기의 높이가 $H=15$ mm인 경우가 가장 효과적인 최대 와도와 평균순환을 발생시키고 주유동방향으로 일정한 강도를 유지하면서 소멸됨을 확인할 수 있다.

3.4 벽면에서의 표면 온도장 분포

와동 발생기의 높이 변화에 따른 벽면의 온도 분포를 비교하기 위해 메쉬히터를 같은 시간 범위(40 sec) 동안 작동시켜 벽면에서의 무차원 표면 온도장을 식(5)을 이용해 구하였다.

$$\theta = \frac{(T_w - T_i)}{(T_g - T_i)} \quad (5)$$

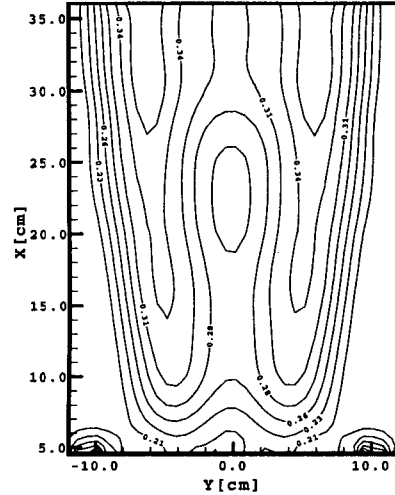


Fig. 11 Contours of non-dimensional temperature for $H=20$ mm

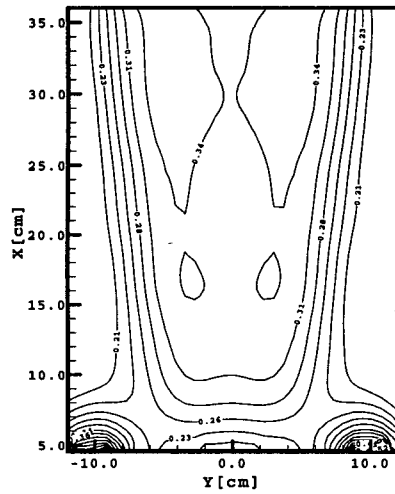


Fig. 12 Contours of non-dimensional temperature for $H=30$ mm

식 (5)에서 T_i 는 유입되는 유동의 초기온도이고, T_w 와 T_g 는 메쉬히터를 사용하여 가열시킨 시간에 따른 액정의 변화 온도와 가열된 유입유동의 최대 온도를 나타낸다. 무차원 표면온도의 불확실성은 Abernethy 등⁽¹²⁾의 방법으로 해석하였고 20대 1의 신뢰도에서 4.7%였다.

Fig. 10~12는 각각 와동 발생기의 높이가 15, 20, 30 mm일 때 벽면 전체의 표면 온도장을 무차원화된 값으로 변환한 후 등 분포곡선을 0.02 간격으로 나타낸 것이다.

Fig. 10~12에서 각각의 최대 무차원 등 온도분포 곡선의 위치는 와동의 코어위치와 거의 일치하며 이는 와동의 하강유동이 벽면에 재부착될 때 발생하는 것으로 여겨진다. 와동의 재부착 특성을 나타내는 와동의 하강영역에서는 $Y=0$ 을 기준으로 하류로 이동할수록 폭방향으로 간격이 넓은 등온분포로 나타났고, 와동이 박리되는 상승영역에서는 하류로 이동할수록 와동 사이의 간격이 멀어지는 경향을 유지하면서 조밀한 등온분포를 나타내었다. 또한 와동 발생기의 높이가 증가할수록 최대 등온분포의 간격이 좁아지는 현상을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 와동 발생기

의 높이가 증가할수록 와동 발생기 바로 뒷전에서 발생하는 와동코어의 위치가 중심방향($Y=0$)을 향해 이동하고 벽면에서 높이(Z) 방향으로 상승한다는 것을 재확인 할 수 있다. 그리고 와동 발생기의 높이의 증가와 관계없이 무차원 등 온도분포 형상은 거의 유사한 경향을 보였다.

3.5 각 측정단면에서의 무차원 온도분포

Fig. 13~16은 와동 발생기의 높이가 15, 20, 30 mm 인 경우에 측정단면이 $X=100, 150, 200, 300$ mm 에서 무차원된 온도분포 값을 비교한 것이다.

Fig. 13은 측정단면 $X=100$ mm에서 와동 발생

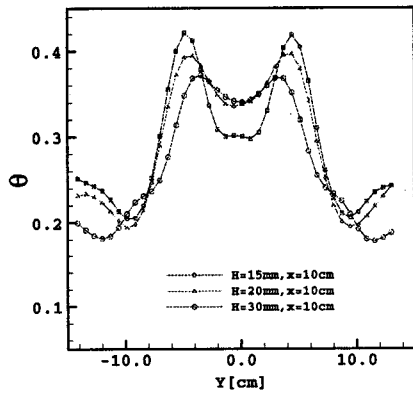


Fig. 13 Spanwise profiles of non-dimensional temperature at $X=100$ mm in case of $H=15, 20, 30$ mm

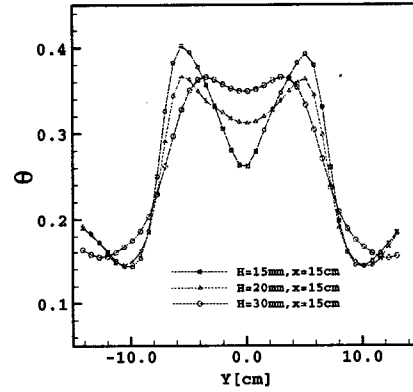


Fig. 14 Spanwise profiles of non-dimensional temperature at $X=150$ mm in case of $H=15, 20, 30$ mm

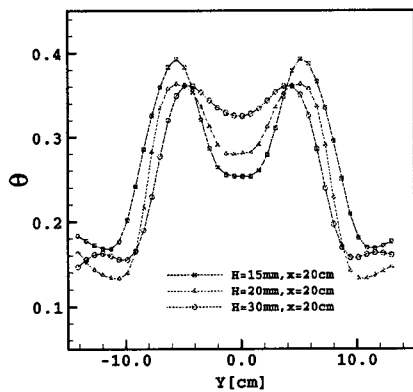


Fig. 15 Spanwise profiles of non-dimensional temperature at $X=200$ mm in case of $H=15, 20, 30$ mm

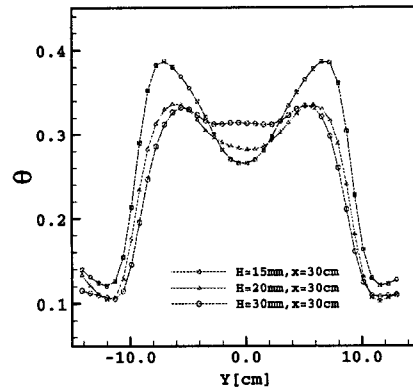


Fig. 16 Spanwise profiles of non-dimensional temperature at $X=300$ mm in case of $H=15, 20, 30$ mm

기의 높이 변화에 따른 무차원화된 온도분포를 나타낸 것이다. 와동 발생기의 높이가 15, 20, 30 mm 모두 두 개의 최대·최소 값이 나타났다. 두 개의 최대 값은 와동 발생기에 의해 발생한 와동이 벽면에 재부착될 때 발생하는 현상이며 이 위치는 와동코어의 위치와 거의 일치하였다. 두 개의 최소 값은 와동에 의해 발생한 유동이 벽면에서 박리될 때 발생하는 현상이다. 폭방향(Y)으로 무차원된 온도구배는 와동 발생기의 높이가 15 mm 인 경우가 가장 심함을 알 수 있고 높이가 20, 30 mm인 경우에 비해 무차원화된 최대 온도 값이 각각 약 2%와 8%정도 증가하였다. 또한 와동 발생기의 높이가 증가할수록 최대 값과 최대 값 사이의 간격이 좁아짐을 알 수 있는데 이는 와동 발생기의 높이가 증가할수록 와동과 와동 사이의 간격이 좁아진다는 것을 의미한다.

Fig. 14~16은 측정단면이 $X=150, 200, 300$ mm에서 와동 발생기의 높이 변화에 따른 무차원 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 13과 비교해 볼 때 하류로 이동할수록 최대 값 사이의 간격은 폭방향으로 멀어짐을 확인할 수 있다. 또한 하류로 이동할수록 와동 발생기의 높이 변화와 관계없이 난류확산으로 인해 와동의 강도가 약해져서 최대 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구의 경우 균일 열유속과 달리 공기가 가열된 상태에서 유입되기 때문에 무차원 온도분포가 높은 경우가 열전달이 가장 잘된다는 것을 의미한다. 따라서 와동 발생기의 높이가 $H=15$ mm인 경우가 모든 측정단면에서 가장 높은 무차원 온도분포를 나타내고 있기 때문에 와동 발생기의 높이가 $H=15$ mm인 경우가 가장 열전달이 잘됨을 확인할 수 있다.

3.6 주유동 방향의 평균 무차원 온도분포

Fig. 17은 와동 발생기의 높이 변화에 따른 주유동 방향에 대한 각 측정단면에서의 평균된 무차원 온도분포를 나타낸 것이다. 각 측정단면에서의 평균된 무차원 온도 값은 Simpson의 적분방법으로 계산하였다.

그림에서 알 수 있듯이 주유동방향의 평균 무차원 온도분포는 와동 발생기의 높이 변화에 관계없이 하류로 이동할수록 감소하는 경향을 보이고 있으며, $X=100$ mm에서 150 mm 사이 영역이 다른 영역에 비해 평균 무차원 온도분포의 구배

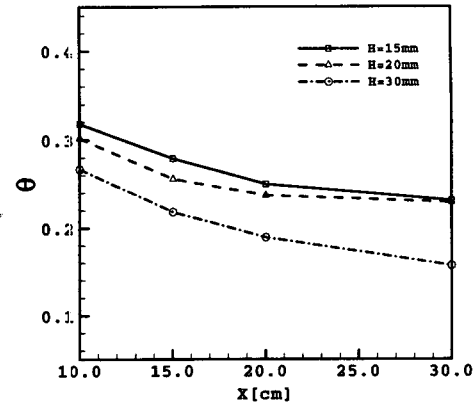


Fig. 17 Streamwise distributions of the averaged non-dimensional temperature on the measured planes for $H=15, 20, 30$ mm

가 심한 반면에 이후 영역에서는 완만하게 변화하는 경향을 보였다. 와동 발생기의 높이가 15 mm인 경우가 가장 높은 평균 무차원 온도분포를 나타내므로 이 경우가 가장 열전달이 잘 됨을 알 수 있다.

4. 결론

와동 발생기의 영각과 간격을 20° 와 40 mm로 고정하고 와동 발생기의 높이를 15, 20, 30 mm로 변화시켜, 와동 발생기 하류에서 발생하는 유동 현상을 5공 프로브로 측정하고 액정을 이용해 표면의 온도분포를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 와동 발생기의 높이 변화와 관계없이 와동과 와동 사이에서는 경계층 두께가 얇아지고 상승영역에서는 경계층 두께가 두꺼워지는 경향을 나타내었다.

(2) 와동 발생기의 높이가 증가할수록 와동의 형상은 하류로 이동할수록 폭방향으로 더 확대된 타원형 형상을 유지하였다.

(3) 각 측정단면에서 최대 와도 및 평균순환 값은 와동 발생기의 높이가 $H=15$ mm인 경우가 가장 컸다.

(4) 와동 발생기의 높이 변화와 관계없이 무차원 표면 온도분포의 형상은 유사한 경향을 보였지만 와동 발생기의 높이가 15 mm인 경우가 20, 30 mm에 비해 높은 온도분포 특성을 나타내었기

때문에 15 mm인 경우가 가장 열전달이 잘 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Fiebig, M., 1997, "Vortices and Heat Transfer," *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 77, No. 1, pp. 3~18.
- (2) Reichert, B. A. and Wendt, B. J., 1993, "An Experimental Investigation off S-Duct Flow Control Using Arrays of Low Profile Vortex Generations," *AIAA Paper* 93~0019.
- (3) Wendt, B. J. and Hingst, W. R., 1994, "Flow Structure in the Wake of a Wishbone Vortex Generator," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 11, pp. 2234~1140.
- (4) Wendt, B. J. and Greber, I., 1993, "Structure and Development of Streamwise Vortex Arrays Embedded in a Turbulent Boundary Layer," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 2427~2444.
- (5) Pauley, W. R. and Eaton, J. K., 1988, "The Fluid Dynamics and Heat Transfer Effects of Streamwise Vortices Embedded in a Turbulent Boundary Layer," Report MD-51, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
- (6) 양장식, 나중문, 이기백, 1995, "선형 터빈 캐스케이드 끝벽의 열전달 특성에 관한 연구," 대한기계학회, 제19권, 제9호, pp. 2386~2398.
- (7) 이기백, 김태영, 양장식, 1997, "색상포착기법과 수치 계산을 이용한 3차원 밀폐공간 내의 자연 대류 연구," 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제12호, pp. 1595~1607.
- (8) Gillespie, D. R., Wang, Z. and Ireland, P. T., 1995, Heating Element," Patent Application PCT/GB96/02017.
- (9) 양장식, 1995, "선형 터빈 익렬 내의 3차원 유동과 끝벽의 열전달 특성에 관한 연구," 부산대학교 박사학위논문.
- (10) 한동주, 1999, "종방향 와동쌍의 상호작용과 유동특성에 관한 연구," 부산대학교 석사학위논문.
- (11) Weshphal, R. V., Pauley, W. R. and Eaton, J. K., 1987, "Interaction Between a Vortex and a Turbulent Boundary Layer-Part I: Mean Flow Evolution and Turbulence Properties," NASA TM88361.
- (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.